



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV GEOTECHNIKY
INSTITUTE OF GEOTECHNICS

STUDIUM FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ SYSTÉMU SYENIT- ENKLÁVA Z LOMU KRÁLOVEC

PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF THE SYSTEM SYENITE-
ENCLAVE IN THE KRÁLOVEC QUARRY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

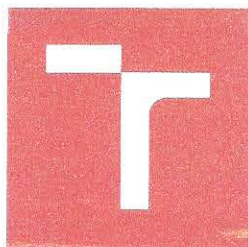
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Jiří Umlauf

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. RNDr. LUKÁŠ KRMÍČEK, Ph.D.

BRNO 2017



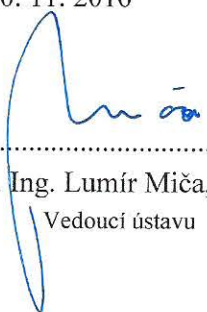
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

STUDIJNÍ PROGRAM	B3607 Stavební inženýrství
TYP STUDIJNÍHO PROGRAMU	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
STUDIJNÍ OBOR	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
PRACOVISŤE	Ústav geotechniky

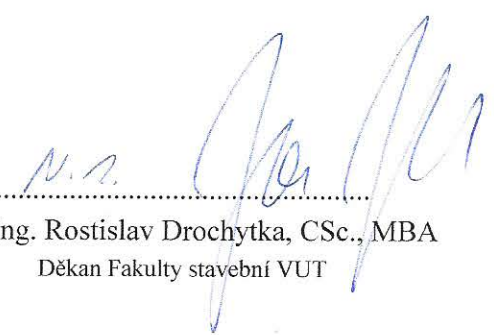
ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

STUDENT	Jiří Umlauf
NÁZEV	Studium fyzikálně-mechanických vlastností systému syenit-enkláva z lomu Královec
VEDOUCÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	doc. RNDr. Lukáš Krmíček, Ph.D.
DATUM ZADÁNÍ	30. 11. 2016
DATUM ODEVZDÁNÍ	26. 5. 2017

V Brně dne 30. 11. 2016


.....
doc. Ing. Lumír Miča, Ph.D.
Vedoucí ústavu




.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- DIDIER, J.; BARBARIN, B. *Enclaves and granite petrology*. Amsterdam: Elsevier, 1991, 625 p.
- HOLUB, F. V. Ultrapotassic plutonic rocks of the durbachite series in the Bohemian Massif: Petrology, geochemistry and petrogenetic interpretation. *Sborník geologických věd, ložisková geologie, mineralogie*, 1997, 31, 5–24.
- KRMÍČEK, L. *Posouzení vlivu přítomnosti kompozičně odlišných enkláv na fyzikálně mechanické vlastnosti základových hornin z žulového a syenitového masívu: pilotní studie z ČR*. MS, habilitační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2015, 116 p.
- ULUSAY, R. (ed) *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014*. Cham: Springer international publishing Switzerland, 2015, 293 p.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ (ZADÁNÍ, CÍLE PRÁCE, POŽADOVANÉ VÝSTUPY)


Bakalářská práce vychází z geotechnické vědní disciplíny mechanika hornin. Podstatou práce bude studium pevnostních charakteristik syenitoidů a jejich mafických mikrogranulárních enkláv, které student odebere v aktivně těžném lomu Královec u Jaroměřic nad Rokytnou. Studium fyzikálně-mechanických vlastností systému syenit-enkláva je velmi důležité a aktuální téma, neboť právě v těchto horninách je plánováno zbudování možného hlubinného úložiště radioaktivních odpadů. Při studiu fyzikálně-mechanických vlastností student využije nově instalovanou infrastrukturu centra AdMaS.

Výsledky studia fyzikálně-mechanických vlastností systému syenit-enkláva budou prezentovány formou přehledných tabulek a grafů a budou též náležitě okomentovány v textové části bakalářské práce.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ/DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).



doc. RNDr. Lukáš Krmíček, Ph.D.

Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Autor se v této bakalářské práci zabývá studiem mechanických vlastností syenitoidů a jejich mafických mikrogranulárních enkláv odebraných v aktivně těženém lomu Královec u obce Jaroměřice na Rokytňou. V rešeršní části práce jsou popsány vybrané metody pro určování fyzikálně-mechanických vlastností a je zde také přiblížena geologie zkoumané lokality. V praktické části jsou popsány a diskutovány výsledky z měření fyzikálně-mechanických vlastností těchto hornin.

KLÍČOVÁ SLOVA

Mechanika hornin, třebíčský masiv, syenit, enkláva, skleroskopická tvrdost, jednoosá tlaková pevnost, triaxiální pevnost, Mohr-Coulombův model

ABSTRACT

The bachelor thesis focuses on mechanical properties of syenitoids and their mafic microgranular enclaves collected in actively mined quarry Královec near Jaroměřice nad Rokytňou. In overview part of the thesis are described selected methods for determining the physical-mechanical properties of the rocks as well as geology of the studied site. The practical part brings the results and principal conclusions from the measurements of the mechanical properties of these rocks.

KEYWORDS

Rock mechanics, Třebíč massif, syenite, enclave, scleroscopic hardness, uniaxial compressive strength, triaxial strength, Mohr-Coulomb model

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Jiří Umlauf *Studium fyzikálně-mechanických vlastností systému syenit-enkláva z lomu Královec*. Brno, 2017. 60 s., 0 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky. Vedoucí práce doc. RNDr. Lukáš Krmíček, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 24. 5. 2017

Jiří Umlauf
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval všem, kteří mi pomohli s vypracováním mé bakalářské práce. Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. RNDr. Lukáši Krmíčkoví, Ph.D. za čas, cenné rady a připomínky. Ing. Martinu Závackému za realizaci laboratorních zkoušek ve vědecko-výzkumném centru AdMaS. Ing. Petru Žittovi z Ústavu stavebního zkušebnictví za pomoc při výrobě zkušebních těles. Ing. Juraji Chalmovskému, Ph.D. za pomoc při kalibraci konstitutivního modelu. V neposlední řadě děkuji celému Ústavu geotechniky, kde jsem mohl konzultovat své dotazy a měl možnost tuto práci vypracovat.

Velké poděkování patří také mé rodině a všem mým blízkým, kteří mi byli při studiu a vypracování bakalářské práce velkou morální oporou a poskytli mi podmínky pro dokončení studia. Děkuji Vám!

V Brně dne 24. 5. 2017

Jiří Umlauf
autor práce

OBSAH

1	Úvod	9
2	Teoretická část.....	10
2.1	Vybrané mechanické vlastnosti	10
2.1.1	Indexové vlastnosti.....	10
2.1.2	Pevnostní vlastnosti	11
2.2	Základní fyzikální (hmotové) vlastnosti	16
2.2.1	Hustota.....	16
2.2.2	Objemová hmotnost	17
2.2.3	Pórovitost.....	18
2.2.4	Hutnost	18
2.3	Geologická charakteristika	18
2.3.1	Třebíčský masiv.....	20
2.3.2	Problematika hlubinných úložišť radioaktivního odpadu	21
2.3.3	Mafické mikrogranulární enklávy	21
3	Praktická část.....	23
3.1	Odběr vzorků a zhotovení zkušebních těles	23
3.2	Určení hmotových vlastností	24
3.3	Petrografický rozbor	28
3.4	Skleroskopická tvrdost.....	32
3.5	Pevnost v příčném tahu.....	34
3.6	Pevnost v jednoosém tlaku	37
3.7	Triaxiální pevnost	39
3.7.1	Triaxiální pevnost syenitu	39
3.7.2	Triaxiální pevnost enkláv	43
3.7.3	Triaxiální pevnost kontaktu syenit-enkláva.....	46
3.8	Mohr-Coulombova podmínka porušení.....	48
3.9	Charakteristický tvar pracovního diagramu.....	49
3.10	Kalibrace Mohr-Coulombova konstitutivního modelu	50
3.10.1	Kalibrace syenitu	50
3.10.2	Kalibrace enklávy	51

4	Diskuze výsledků	54
5	Závěr	55
6	Seznam použité literatury	56
7	Seznam použitých obrázků	58
8	Seznam použitých zkratk a symbolů	60
8.1	Seznam použitých symbolů	60
8.2	Seznam použitých zkratk	60

1 Úvod

Horniny s přítomností esteticky zajímavých jemnozrnných tmavých uzavřenin (mafických mikrogranulárních enkláv) představují materiál využívaný jak pro ušlechtilou kamenickou výrobu, tak pro výrobu drceného kameniva. Při pohledu na takovou horninu ale musí stavebního inženýra napadnout hned několik otázek. Ovlivní přítomnost enkláv pevnost kompozitu enkláva-hornina? A do jaké míry? Je kontakt horniny a enklávy předurčenou plochou porušení? Navzdory tomu se z hlediska mechaniky hornin zatím jedná o relativně neprobádanou oblast. V České Republice se touto problematikou zabývá pouze doc. Krmíček [1], kdy jeho habilitační práce je jedinou ucelenou studií na dané téma v českém jazyce.

Předmětem této bakalářské práce je studium fyzikálních a mechanických vlastností horninového kompozitu složeného ze syenitu a mafické mikrogranulární enklávy. Zkoumané vzorky byly odebrány v rámci třebíčského syenitového masivu v aktivně těženém lomu Královec poblíž obce Jaroměřice nad Rokytnou. Třebíčský masiv je těleso, které je mimořádně bohaté na výskyt mafických mikrogranulárních enkláv. Přidanou hodnotou této bakalářské práce je fakt, že horniny třebíčského masivu představují ideální masiv pro vybudování hlubinného úložiště radioaktivního odpadu [2]. Hlubinné úložiště je rozsáhlá a náročná podzemní stavba, která musí splňovat přísné nároky na bezpečnost provozu a dlouhou životnost, a proto je žádoucí získat co nejvíce informací o fyzikálně-mechanických vlastnostech okolních hornin tvořených kompozitním systémem enkláva-syenit.

2 Teoretická část

2.1 Vybrané mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti charakterizují chování hornin při působení vnějšího zatížení. Zpravidla je dělíme na vlastnosti pevnostní, indexové, deformační a reologické. [3] Při zkoumání mechanických vlastností v laboratoři musíme vzít v úvahu, že testujeme pouze malý vzorek horninové hmoty. Na výsledné chování horninového masivu má vliv celá řada dalších činitelů. Zejména existence, četnost, velikost a orientace různých diskontinuit, výchozí stav napjatosti a přetvoření, teplota, čas vlhkost a další.

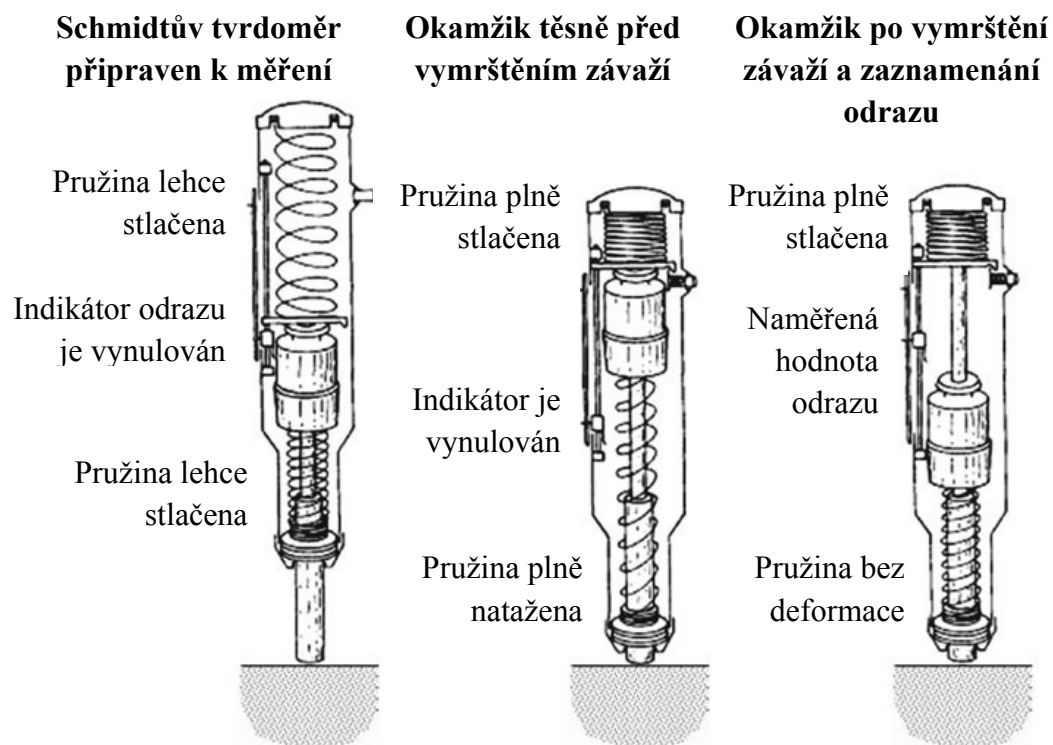
V současné době existuje několik publikací a norem popisující zkoušení mechanických vlastností hornin. Mezi nejdůležitější patří kompendium Mezinárodní společnosti pro mechaniku hornin (ISRM) [4] [5], které ve svém posledním vydání shrnuje poznatky v tomto oboru za období 2007–2014. V České Republice jsou pro provádění jednotlivých zkoušek používány také postupy popsané v českých technických normách ČSN, případně českých verzích evropských norem ČSN EN. Trendem posledních let je sjednocení všech těchto poznatků do systému norem pro stavebnictví EUROCODE (EC). O mechanice hornin pak z části pojednává Eurokód 7. [6]

2.1.1 Indexové vlastnosti

Indexové vlastnosti umožňují nepřímo získat pevnostní a deformační charakteristiky. Zpravidla se jedná o nedestruktivní a méně náročné zkoušky (časově i finančně) než zkoušky pevnostní či deformační. Díky své jednoduchosti umožňují snadnou a jednoduchou realizaci v terénu i laboratoři. Jedná se zejména o vtláčnou pevnost, skleroskopickou tvrdost nebo index pevnosti v bodovém zatížení. Výsledné hodnoty pevnostních či deformačních veličin jsou pak určovány na základě korelačních vztahů, jde tedy o hodnoty přibližné. Tuto nepřesnost ale můžeme do jisté míry minimalizovat větším počtem měření.

2.1.1.1 Skleroskopická tvrdost Schmidtovým kladívkem

Díky své jednoduchosti a nízkým nákladům na měřicí zařízení se v současnosti jedná o nejčastější indexovou zkoušku. Měřenou veličinou je velikost odrazu závaží vymrštěného stlačenou pružinou od čepu, který je opřen o povrch měřeného tělesa. Tento princip je znázorněn na obrázku níže.



[Obr. 1] Princip práce Schmidtova kladívka. Převzato a upraveno z [4]

Naměřená hodnota odrazu se pak na základě korelačních vztahů převádí na jednoosou tlakovou pevnost. Je ale potřeba brát ohled na orientaci měřicího přístroje při provádění zkoušky a uvažovat s působením gravitační síly.

Schmidtovy tvrdoměry se vyrábí ve třech variantách s různou velikostí vyvozené energie. Jedná se o typ L (leicht) s vyvozenou energií 0,75 J, typ N (normal) s vyvozenou energií 2,25 J a typ M schopný vyvodit energii 30 J. [8] V mechanice hornin se zpravidla omezujeme pouze na použití typů L a N.

Pro laboratorní testování je nejvhodnější model L, který díky nižší nárazové energii snižuje riziko poškození vzorku při dopadu úderného čepu. Zároveň je ale potřeba dbát na dostatečné upnutí vzorku, aby nedocházelo k nežádoucímu pohlcení energie například pohybem vzorku na pracovní ploše. Pro měření in-situ a na velkých horninových blocích je vhodnější použít model N, který vyvozuje vyšší energii a tím díky větší aktivní zóně postihne větší objem zkoumaného materiálu.

2.1.2 Pevnostní vlastnosti

Společným znakem všech pevnostních zkoušek je, že se zkušební těleso zatěžuje až do jeho porušení. Hledanou veličinou je pak napětí na mezi porušení. Při realizaci zkoušky je potřeba vzít v úvahu směr působení zatížení vůči případným diskontinuitám či plochám vrstevnatosti. Jednotlivé zkoušky se pak liší dle způsobu namáhání vzorku.

2.1.2.1 Pevnost v jednoosém tlaku

Při této zkoušce je vzorek zatížen jednoosým plošným zatížením, které se plynule zvyšuje až do jeho porušení. Hledanou hodnotou je pak maximální tlakové napětí ve vzorku dosažené během testu. Vypočte se z podílu maximální síly vyvozené lisem a plochy podstavy vzorku dle vztahu:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad [\text{Mpa}] \quad [5]$$

kde: P maximální síla vyvozená při zkoušce [kN]
 A₀ plocha podstavy zkušebního tělesa [mm²]

Pro správný průběh zkoušky a naměření vypovídajících hodnot je potřeba dodržet několik zásad. Tyto zásady jsou popsány buď v příslušných normách, nebo se lze řídit doporučeními vydanými ISRM. V zásadě se všechny tyto předpisy shodují na tom, že ideální vzorek by měl být pravidelný (válec nebo hranol) s poměrem výšky ku šířce přibližně 2,5 až 3,0. Zatěžované plochy mají být vybroušené, bez nerovností či zakřivení a vzorek má být zatěžován rovnoměrně, rychlostí přibližně 0,5 až 1,0 MPa/s. [5]

Eurokód 7 se při stanovování jednoosé tlakové pevnosti doporučuje držet pokynů ISRM, nicméně připouští některá drobná zjednodušení. Jedná se především o méně přísné geometrické tolerance což zjednodušuje přípravu zkušebních těles.

Horninové masivy se často nachází pod hladinou podzemní vody a vlhkost má značný vliv na tlakovou pevnost. Voda v pórech horniny působí jako mazivo, snižuje soudržnost a tím i výslednou pevnost. Proto je často prováděno testování jednoosé tlakové pevnosti na vodou nasycených vzorcích. Z podílů tlakových pevností nasyceného a vysušeného vzorku pak můžeme stanovit koeficient změknutí, který vyjadřuje úbytek pevnosti vodou nasyceného vzorku oproti vysušenému.

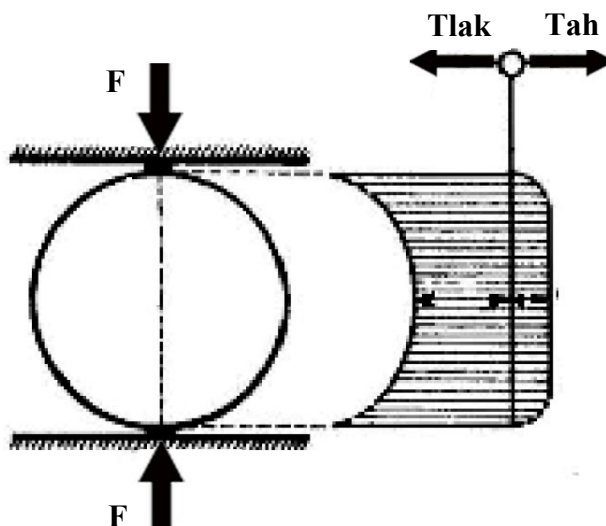
2.1.2.2 Pevnost v příčném tahu

Tahová pevnost horniny je důležitá materiálová charakteristika potřebná například jako jeden ze vstupních parametrů do numerických modelů. Nicméně přímé měření této veličiny (tzv. prosté tahové pevnosti) je náročné na přípravu, proto se častěji realizuje zkouška pevnosti v příčném tahu (tzv. brazilská zkouška).

Při brazilské zkoušce je vzorek zatěžován tlakem na dvou protilehlých plochách. Díky tvaru zkušebního tělesa a orientaci zatížení vznikají na průřezu tahová napětí, která vedou k tahovému porušení (rozštěpení) vzorku.



[Obr. 2] Izolinie hlavních napětí na válcovém průřezu při brazilské zkoušce, převzato a upraveno z [7]



[Obr. 3] Průběh napětí na válcovém průřezu při brazilské zkoušce, převzato a upraveno z [3]

Zkouška se provádí na pravidelných válcových tělesech, starší české normy připouští i testování hranolů. [9] Průměr válce se volí přibližně 54 mm a délka přibližně stejná jako poloměr. Povrch vzorku musí být hladký, bez větší nerovností a zatížení se musí nanášet rovnoměrně. Doporučená zatěžovací rychlost je 200 N/s. [5]

Pevnost v příčném tahu se pak vypočte odlišně pro válcové nebo hranolové zkušební tělesa dle vztahů:

Pro válcové zkušební tělesa:

$$\sigma_{\text{Ptp}} = 0,637 \frac{F}{d \cdot l} \quad [\text{Mpa}]$$

Pro hranolové zkušební tělesa:

$$\sigma_{\text{Ptp}} = 0,734 \frac{F}{b \cdot l} \quad [\text{Mpa}]$$

[9]

kde:	F	maximální síla vyvozená při zkoušce [MN]
	l	délka vzorku [m]
	d	průměr válce [m]
	b	úhlopříčka hranolového zkušebního tělesa [m]

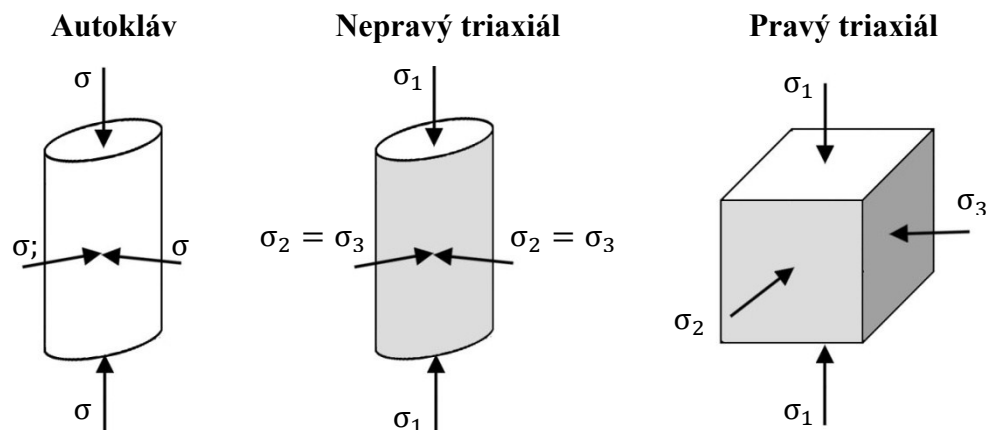
Když porovnáme tahovou pevnost získanou z brazilské zkoušky s pevností naměřenou při prosté tahové zkoušce zjistíme, že se tyto hodnoty prakticky shodují. Výjimkou ale mohou být některé pískovce, kde pevnost dosažená při brazilské zkoušce může být až dvojnásobek prosté tahové pevnosti. [10]

2.1.2.3 Triaxiální pevnost

Zkouška tříosé pevnosti nám umožňuje ve vzorku vytvořit podobný stav napjatosti, kterou má hornina uvnitř horninového masivu. Při této metodě není předurčená plocha porušení, takže vzorek se poruší vždy v nejslabším místě. Dále díky tříosé napjatosti dochází ke zpevnění materiálu a mohou se více rozvinout plastické deformace na rozdíl třeba od prosté tlakové zkoušky, kde se většina hornin porušuje křehce. Díky tomu se jedná o velmi užitečnou a vypovídající zkoušku, která se i navzdory náročné přípravě a nákladnému měřicímu zařízení stává stále více používanou.

Triaxiální přístroje dělíme podle toho v kolika osách jsme schopni vzorek zatěžovat různou velikostí zatížení na tři typy:

- Autoklávy, kde je vzorek po celém svém povrchu zatěžován stejným tlakem, platí: $\sigma = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$
- Nepravé triaxiály, kde je válcový vzorek na podstavách stlačován tlakem σ_1 a zároveň na jeho plášť působí komorový tlak σ_2 , platí: $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$
- Pravé triaxiály, kde je zkušební těleso tvaru krychle stlačováno ve všech třech směrech různou silou, platí $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$



[Obr. 4] Rozdělení triaxiálních přístrojů

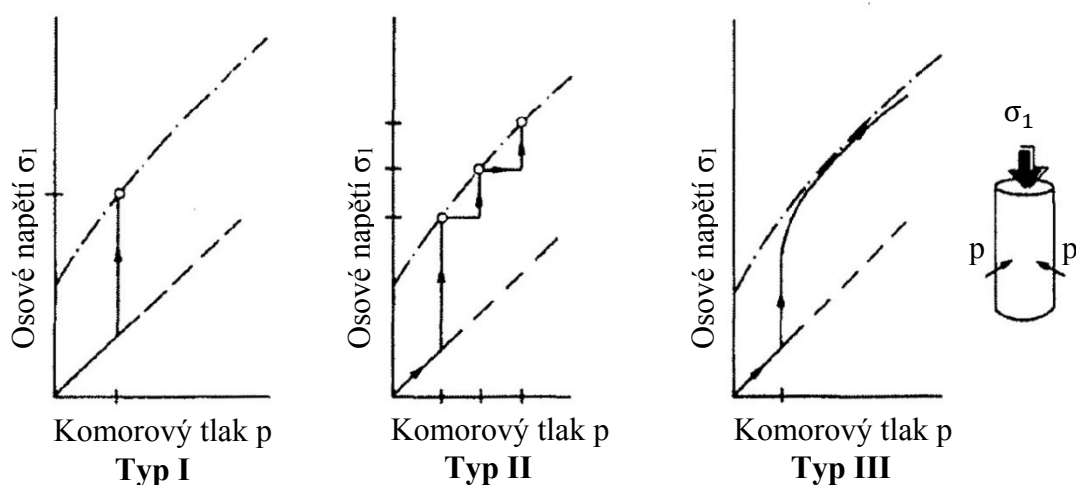
V praxi se používají především nepravé triaxiální přístroje, kdy osově zatížení σ_1 je vyvozeno hydraulickým lisem a komorový tlak na plášť zkušební tělesa $\sigma_2 = \sigma_3$ je zajištěn tlakem hydraulického oleje. Plášť vzorku se musí upravit tak, aby bylo zabráněno vnikání tohoto oleje do vzorku. To je v praxi realizováno pružnou membránou, která obaluje plášť zkušební tělesa.

Požadavky na zkušební těleso a jeho rozměry se víceméně shodují se zkouškou v prostém tlaku. Výška zkušební tělesa je opět doporučována jako dvojnásobek až trojnásobek průměru a průměr se volí dle použitého jádrového vrtáku. Doporučován je typ vrtáku NX, jehož vnitřní průměr je 54 mm. Nejmenší rozměr tělesa by měl být alespoň desetinásobek délky největšího zrna zkoumané horniny a dále je také potřeba dbát na hladkost a rovinnost stěn zkušební tělesa. [5]

Samotná zkouška se pak dle doporučení ISRM může realizovat ve třech režimech. Prvním je typ I - „individual test“, kdy osový a komorový tlak roste stejnou rychlostí až do předurčené hodnoty. Po dosažení této hodnoty dále roste jen osově zatížení až do porušení vzorku. Vzorek zatěžujeme doporučenou zatěžovací rychlostí 0,5–1,0 MPa/s tak, aby přírůstek přetvoření byl konstantní. [5]

Dalším režimem zatěžování je typ II - „multiple failure state test“. Zatěžování probíhá po krocích a celý proces můžeme rozdělit do několika fází. V první fázi se vzorek zatěžuje stejně velkým osovým a komorovým tlakem až do dosažení určené hodnoty. V druhé fázi zůstává komorový tlak konstantní a v režimu řízené deformace roste pouze osově zatížení a rychlost růstu poměrného přetvoření volíme v intervalu $10^{-2}/\text{sec}$ až $10^{-5}/\text{sec}$. Ve třetí fázi udržujeme osově zatížení na dosažené hodnotě a roste pouze komorový tlak obdobně jako v minulé fázi v režimu řízené deformace. Fáze dvě a tři opakujeme, dokud nedojde k porušení vzorku osovým zatížením a dostaneme se na hodnotu reziduální pevnosti. Postupné snižování komorového tlaku nám pak umožní vykreslit křivku reziduální pevnosti. [5]

Posledním typem triaxiální zkoušky je typ III - „continuous failure state test“. V první fázi se vzorek stejně jako u zkoušky typu II zatěžuje iniciačním zatížením, kdy osový zatížení je stejné jako zatížení na stěny vzorku. Poté vzorek zatěžujeme pouze osovým tlakem tak, aby nárůst poměrného přetvoření byl v intervalu $10^{-2}/\text{sec}$ až $10^{-5}/\text{sec}$ až do doby, kdy průběh přetvoření začne signalizovat začínající porušení vzorku. Postupně pak k osovému tlaku začneme přidávat komorový, čímž dojde ke zpevnění, a vzorek můžeme dále zatěžovat kombinací osového a komorového tlaku až do jeho úplného porušení. Osový napětí pak klesne až na svoji reziduální hodnotu a postupné snižování komorového tlaku nám umožní vykreslit křivku reziduální pevnosti. [5]



[Obr. 5] Typy triaxiálních zkoušek, převzato a upraveno z [5]

Při realizaci testu typu I musíme pro vykreslení obálky vrcholových (čerchovaná čára) nebo reziduálních pevností (čárkovaná čára) udělat sérii více měření s různým bodem, kde komorový tlak zůstane konstantní a vzorek zatěžujeme rostoucím osovým zatížením. Při testech typu II a III můžeme tyto údaje zjistit už při měření na jednom zkušebním tělese, je ale potřeba vzít v úvahu větší náročnost těchto zkoušek. [5]

2.2 Základní fyzikální (hmotové) vlastnosti

Fyzikální vlastnosti popisují horninovou hmotu a vyjadřují její vlastnosti za určitých podmínek. Jsou závislé zejména na minerálním složení, stavbě a struktuře horninové matérie. Lze je rozdělit na základní, hydrofyzikální a fyzikálně-chemické. [3]

2.2.1 Hustota

Dříve byla tato veličina označována také jako měrná hmotnost. Obecně se jedná o základní popis hmoty, který vyjadřuje jakou hmotnost má jednotkový objem dané látky. U hornin musíme vzít v úvahu, že se nejedná o homogenní látku,

ale že obsahuje různé množství vzduchových pórů, které do horninové hmoty nezahrnujeme, a proto musíme hustotu hornin určovat pyknometrickou metodou.

Pyknometrická metoda spočívá v tom, že se hornina rozdrtí nebo rozeleme na tak jemné částice, aby už neobsahovala žádné póry, výsledná drť se vysuší a i s pyknometrem zváží. V dalším kroku vložíme vysoušenou drť do pyknometru, kde se zalije vodou a následně přivede k varu, aby se z vody vyloučily případné vzduchové bubliny. Na závěr se pyknometr nechá vychladnout, a i se směsí se zváží. Výsledná hustota se spočte ze vztahu:

$$\rho_s = \frac{(m_2 - m_1)\rho_w}{V\rho_w + (m_1 - m_3)} \quad \left[\frac{kg}{m^3}\right] \quad [3]$$

kde:	V	objem pyknometru [m ³]
	ρ_w	hustota vody při 20 °C [kg/m ³]
	m_1	hmotnost pyknometru[kg]
	m_2	hmotnost pyknometru se vzorkem[kg]
	m_3	hmotnost pyknometru naplněného vodou se vzorkem [kg]

2.2.2 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost se na rozdíl od hustoty stanovuje ze vzorku jako celku, tedy včetně dutin a pórů. Na její velikost má vliv minerální složení, pórovitost a vlhkost. Velký obsah tmavých minerálů zpravidla vede k vyšším hodnotám objemové hmotnosti (např. bazalt nebo gabro) a naopak velká pórovitost objemovou hmotnost snižuje (např. pemza). Objemovou hmotnost určujeme na vzorku, který je ve své přirozené vlhkosti, případně na vzorku plně nasyceném vodou nebo naopak zcela vysušeném.

Objemová hmotnost se pak stanoví dle vztahu:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \left[\frac{kg}{m^3}\right] \quad [3]$$

kde:	V	objem vzorku [m ³]
	m	hmotnost vzorku [kg]

U pravidelných těles stanovíme jejich objem jednoduše měřením a výpočtem dle známých geometrických vztahů. Objem nepravidelných těles určíme buď dvojím vážením, kdy poprvé vážíme suchý vzorek a podruhé vzorek ponořený do vody a nebo použijeme některý z různých typů objemoměrů. Přitom musíme pamatovat, že u pórovitých hornin se nesmí voda dostat dovnitř pórů, proto pokud je to nutné, je třeba vzorek opatřit ochranným, nejčastěji parafinovým obalem.

Objemová hmotnost je jeden ze základních údajů, který je potřebný do geotechnických výpočtů, zejména pro výpočet horninových tlaků na konstrukce nebo pro výpočet napjatosti v horninovém masivu. Vedle toho můžeme na základě objemové hmotnosti přibližně posoudit kvalitu testované horniny. Zpravidla platí,

že s rostoucí objemovou hmotností roste i pevnost horniny. Například pískovce s objemovou hmotností okolo 2200 kg/m³ dosahují pevností okolo 70 MPa. Naopak čediče, jejichž objemová hmotnost bývá přibližně 2900 kg/m³, často dosahují pevností až přes 180 MPa.

2.2.3 Pórovitost

Podíl pórů na celkovém objemu testovaného vzorku vyjadřujeme pórovitostí. Tu nestanovujeme přímo, ale výpočtem z poměru hustoty a objemové hmotnosti vyjádřené v procentech podle vztahu:

$$n = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)100 \quad [\%] \quad [3]$$

kde: ρ objemová hmotnost [kg/m³]
 ρ_s hustota [kg/m³]

U běžných geomateriálů nemá v mechanice hornin pórovitost velký význam, protože se zpravidla u pevných skalních hornin pohybuje v rozsahu několika procent. Výjimkou jsou extrémně porézní sedimenty nebo vulkanity s vysoce porézní texturou, kde pórovitost často přesahuje deset procent. U tohoto typu hornin má určení pórovitost zásadní význam – zejména pro posouzení jejich propustnosti nebo plynodajnosti.

2.2.4 Hutnost

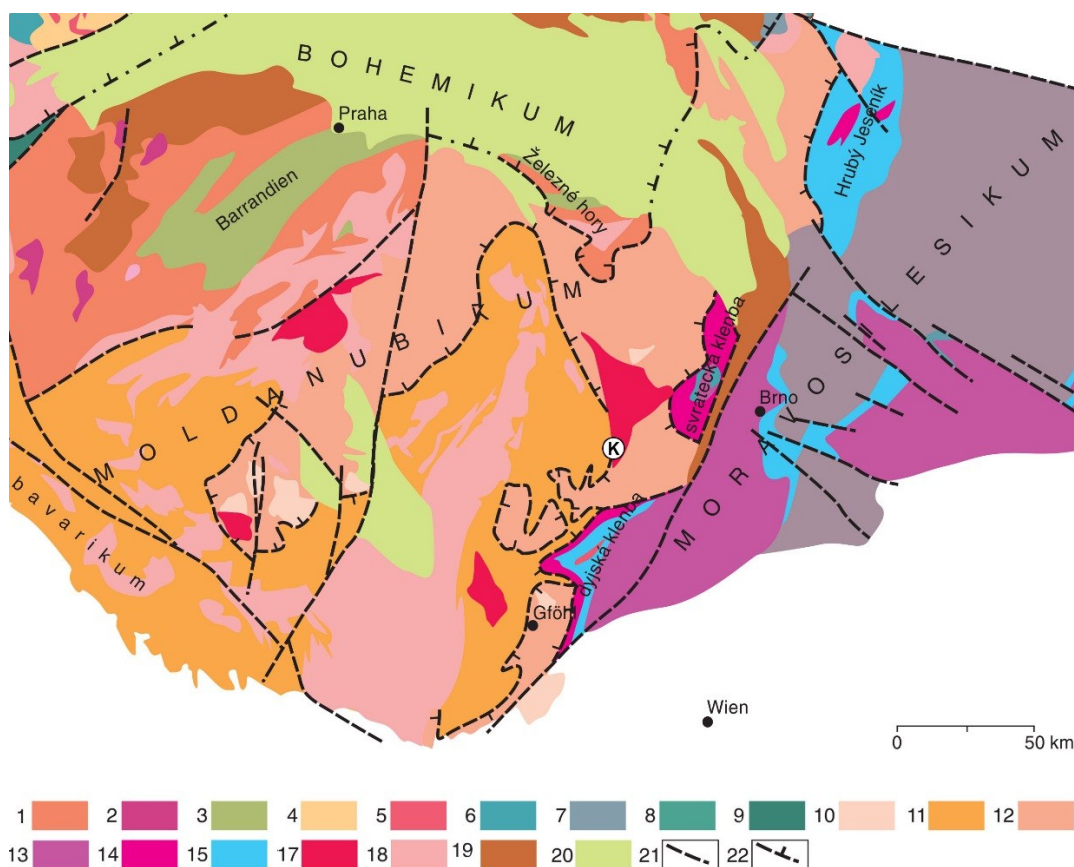
Jedná se pouze o doplněk pórovitosti do objemu celého vzorku horniny. Stanovíme ji dle vztahu:

$$Hutnost = 100 - n \quad [\%]$$

kde: n pórovitost vzorku [%]

2.3 Geologická charakteristika

Vzorky syenitů uzavírajících mafické mikrogranulární enklávy jsem pro potřeby této práce odebral v aktivně těženém lomu Královec poblíž obce Jaroměřice nad Rokytnou. Horniny tohoto lomu jsou geologickou součástí největšího syenitového tělesa v rámci variské Evropy – třebíčského masivu.



(K) – Lom Královec, místo odběru vzorků

Tepelsko-barrandienská oblast (Bohemikum, středočeská oblast): 1 svrchnoproterozoické sedimenty a vulkanity, 2 prevariské (kambro-ordovické) magmatity, 3 staropaleozoické sedimenty a vulkanity (kambrium až devon);

Moldanubická zóna: 11 silně metamorfované vulkanosedimentární komplexy proterozoického až paleozoického stáří (ostrongká a drosendorfská jednotka), 12 allochtonní silně metamorfované komplexy gföhlské jednotky s relikty vysokotlakých hornin;

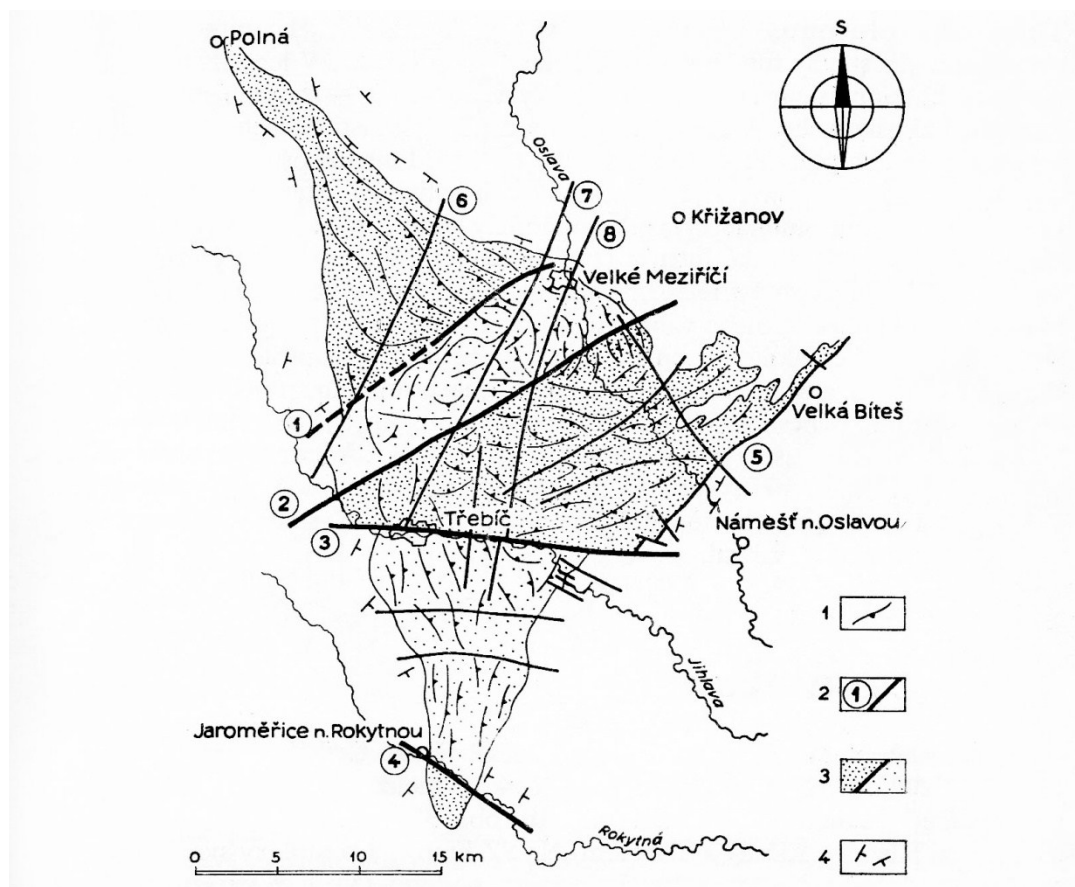
Moravsko-slezská oblast (moravosilesikum včetně brunovistulika): 13 kadomský fundament brunovistulika (kadomské granitoidy a jejich metamorfni plášť, 14 kadomské ortoruly moravosilesika, 15 devonské až spodnokarbonské platformní i zvrásněné vulkanosedimentární formace moravosilesika a brunovistulika, 16 visézská až namurská klastika variského flyše s přechodem do slabě deformovaných sedimentů variské předhlubně;

Variské granitoidy: 17 melanokráttní žuly a syenity (durbachity) 18 tonality až granity (350–305 Ma), 19 pemokarbonské platformní sedimenty, 20 mladší platformní pokryv, 21 významné zlomové linie, 22 příkrovové násuny.

[Obr. 6] Výřez z geologické mapy České republiky. Převzato a upraveno z [11]

2.3.1 Třebíčský masiv

Třebíčský masiv tvoří přibližně trojúhelníkové těleso o rozloze 500 km², které se rozkládá mezi obcemi Polná na severozápadě, Velkou Bíteší na východě a Jaroměřicemi nad Rokytnou na jihu [12]. Masiv je pozdně variského stáří [13] a je porušen řadou zlomů, které dělí těleso do několika segmentů, jenž jsou znázorněny na obrázku níže.



1 - plošná stavba durbachitu podle usměrnění vyrostlic; 2 - hlavní zlomy (1 bochovecký, 2 ořechevský, 3 třebíčský, 4 jaroměřický, 5 bítešský, 6 pavlínský, 7 vlčatínský, 8 velkomeziříčský); 3 - pozvednuté (husté tečky) a pokleslé kry plutonu, 4 - směry a sklony foliace v krystalických břidlicích pláště masivu

[Obr. 7] Přehledná strukturní mapa Třebíčského masivu. Převzato z [14]

Horniny třebíčského masivu, které jsou součástí tzv. durbachitové série, petrograficky odpovídají amfibol-biotititckému melagranitu až melasyenitu [15]. Jde o horniny specifického chemického složení, které jsou bohaté na hořčík a draslík společně se zvýšenými obsahy radioaktivních prvků – thoria a uranu. Jedná se tedy o horniny se zvýšenou radioaktivitou. Zejména v severní části masivu, kde nejsou syenitoidní horniny vlivem tektonického porušení tolik rozpukané, jsou těženy jako surovina pro ušlechtilou kamenickou výrobu (například v lomu Kamenná).

2.3.2 Problematika hlubinných úložišť radioaktivního odpadu

V úvodu této kapitoly bylo zmíněno, že v třebíčském masivu se nachází lokalita Horka, což je jedna z lokalit vytipovaných pro budoucí možné hlubinné úložiště radioaktivního odpadu. Mimo tuto lokalitu zkoumá v současné době Správa úložišť radioaktivních odpadů dalších šest lokalit, které vyšly jako nejvhodnější z předvýběru na základě již známých vlastností geologického podloží na několika desítkách lokalit v České Republice.

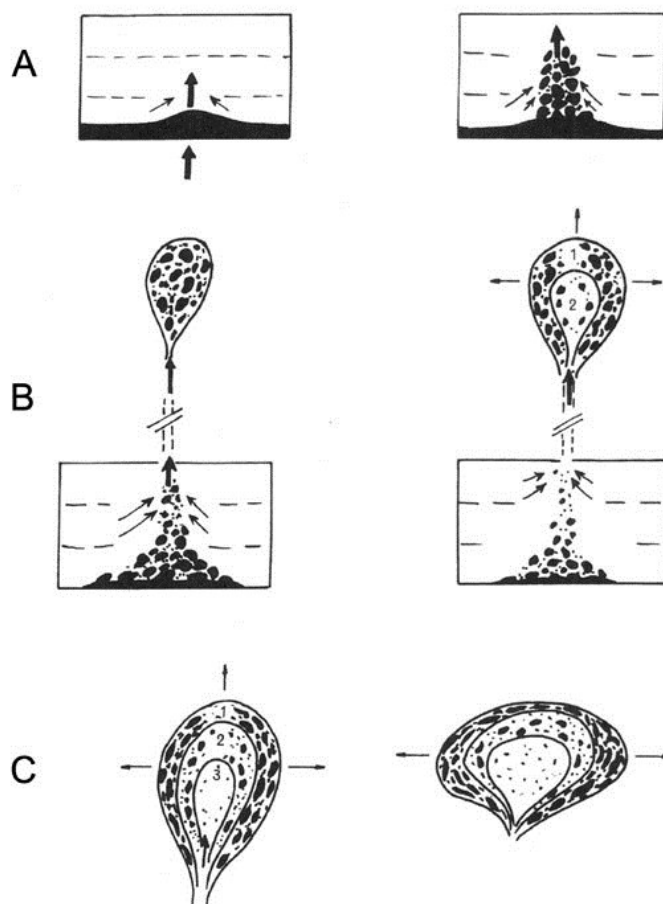
Hlubinné úložiště je velice náročné inženýrské a důlní dílo. Předpokládaná rozloha areálu na povrchu je 23,4 hektarů, která zahrnuje plochu pro manipulaci s radioaktivním odpadem, administrativní budovy a plochu pro manipulaci s vytěženou horninou. Podzemní část v hloubce 500 metrů zabere téměř 440 hektarů a během stavby bude vyrubáno přibližně 2 miliony m³ horniny. Předpokládaný termín začátku výstavby je okolo roku 2050. [2]

Třebíčský masiv se díky své velké rozloze, tektonické stabilitě a určité míře přirozené radioaktivity jeví jako ideální lokalita pro vybudování tohoto díla. Nicméně o vhodné lokalitě se stále vedou diskuze a výběr finální lokality se předpokládá v roce 2025.

2.3.3 Mafické mikrogranulární enklávy

Mafické mikrogranulární enklávy tvoří v syenitoidních horninách třebíčského masivu různě velké uzavřeniny. Vznik enkláv je spojován s procesy míšení bazické (mafické) a kyselé (flesické) taveniny. [17] Mafické mikrogranulární enklávy představují utuhlé „kapky“ bazické taveniny. Jejich mafické (tmavé) zbarvení je dáno větším obsahem tmavých minerálů a jejich jemnozrnnější struktura vznikla díky rychlejšímu tuhnutí magmatu. Enklávy mají zpravidla oválný tvar, který je přednostně protažený ve směru toku magmatu. Jejich velikost se může pohybovat od jednotek centimetrů až do metru. Pokud se více protažených enkláv spojí do jedné, označujeme je termínem synplutonické žíly. [1]

Mechanismus vzniku horninového masivu s obsahem mafických mikrogranulárních enkláv je popsán na obrázku č. 8.



[Obr. 8] Mechanismus vzniku horninového masivu s obsahem mafických mikrogranulárních enkláv. Převzato a upraveno z [16]

A – intruze bazické taveniny; B – výstup syenitoidní taveniny obsahující „kapky“ bazického magmatu; C – vmístění zonálního masivu a jeho protažení ve vodorovném směru

3 Praktická část

S využitím infrastruktury vědecko-výzkumného centra AdMaS při FAST VUT v Brně byla provedena série měření a zkoušek fyzikálně-mechanických vlastností vícesložkových geomateriálů typu syenit-enkláva, jejichž výsledky jsou prezentovány v této části bakalářské práce. Vzorky autor bakalářské práce odebral v aktivně těženém lomu Královec.

3.1 Odběr vzorků a zhotovení zkušebních těles

Testované vzorky byly odebrány v lomu Královec situovaném přibližně 2 kilometry jihovýchodně od obce Jaroměřice nad Rokytnou. Jedná se o aktivně těžený trojetážový lom na kamenivo pro stavební účely, který provozuje společnost COLAS CZ, a.s. Na prostřední etáži byly vzorkovány velké balvany syenitoidů o hmotnosti přibližně 25 kilogramů obsahující uzavřené mafické mikrogranulární enklávy. Při výběru vzorků byl kladen důraz na to, aby hornina nebyla zvětralá.



[Obr. 9] Prostřední etáž lomu Královec, kde byly odebrány studované



[Obr. 10] Ukázka odebraných vzorků hornin. Délka měřítka je 13 cm.

Balvany byly následně převezeny do laboratoří výzkumného centra AdMaS FAST VUT v Brně, kde z nich byly odvrtány jádrové vývrty. K vrtání byl použit normovaný jádrový vrták s diamantovou korunkou typu NX, s průměrem 54,7 mm a vrták s průměrem 36,5 mm. Získané vývrty byly nařezány v laboratořích Ústavu stavebního zkušebnictví FAST VUT v Brně na potřebné délky dle jednotlivých typů zkoušek. U těles, která byla určena pro jednoosou tlakovou nebo triaxiální zkoušku byly ještě dodatečně zabroušeny podstavy, aby nedošlo k ovlivnění zkoušky jejich případnými nerovnostmi.



[Obr. 11] Jádrová vrtačka



[Obr. 12] Zkušební těleso pro triaxiální zkoušku s kontaktem enklávy a hostitelské horniny

3.2 Určení hmotových vlastností

Pro určení hmotových vlastností bylo provedeno u všech zkušebních těles zjištění jejich rozměrů a hmotností. Z těchto parametrů byla následně vypočtena objemová hmotnost. Značení vzorků zvolil autor práce ve formátu KRA-(S/E/SE)-n (např. KRA-S-7), kde KRA označuje lokalitu Královec a písmeno S vyjadřuje, jestli se jedná o syenit, E o enklávu a SE o těleso s kontaktem syenitu a enklávy. Číslo na konci označení je pak pořadovým číslem vzorku.

[Tabulka 1] Hmotové vlastnosti zkušebních těles

KRA-SE-1					Průměrné hodnoty
Průměr [mm]:	54,2	54,3	54,4	54,2	54,3
Délka [mm]:	108,8	108,5	108,7	108,9	108,7
Hmotnost [g]:	709,7				709,7
Objemová hmotnost [kg/m ³]:	-				2821,5

KRA-S-2					Průměrné hodnoty
Průměr [mm]:	54,8	54,9	54,6	54,5	54,7
Délka [mm]:	108,0	107,9	108,0	108,3	108,1
Hmotnost [g]:	711,9				711,9
Objemová hmotnost [kg/m ³]:	-				2803,7

KRA-SE-3					Průměrné hodnoty
Průměr [mm]:	54,3	54,5	54,5	54,5	54,5
Délka [mm]:	108,0	108,1	108,6	108,2	108,2
Hmotnost [g]:	701,0				701,0
Objemová hmotnost [kg/m ³]:	-				2781,7

KRA-E-4					Průměrné hodnoty
Průměr [mm]:	54,7	54,5	54,6	54,7	54,6
Délka [mm]:	56,0	55,6	55,9	56,3	56,0
Hmotnost [g]:	366,0				366,0
Objemová hmotnost [kg/m ³]:	-				2791,3

KRA-E-5					Průměrné hodnoty
Průměr [mm]:	54,5	54,7	54,5	54,6	54,6
Délka [mm]:	56,1	56,5	56,5	55,8	56,2
Hmotnost [g]:	365,8				365,8
Objemová hmotnost [kg/m ³]:	-				2781,2

KRA-S-6					Průměrné hodnoty
Průměr [mm]:	54,9	54,8	54,8	54,7	54,8
Délka [mm]:	55,9	56,1	55,3	55,5	55,7
Hmotnost [g]:	363,4				363,4
Objemová hmotnost [kg/m ³]:	-				2766,2

KRA-S-7					Průměrné hodnoty
Průměr [mm]:	54,9	55,0	54,8	54,9	54,9
Délka [mm]:	55,6	55,8	55,6	55,4	55,6
Hmotnost [g]:	364,0				364,0
Objemová hmotnost [kg/m ³]:	-				2765,6

[Tabulka 1] Hmotové vlastnosti zkušebních těles (pokračování)

KRA-E-8					Průměrné hodnoty
Průměr [mm]:	38,0	38,0	38,2	38,1	38,1
Délka [mm]:	35,6	35,3	35,1	35,1	35,3
Hmotnost [g]:	112,8				112,8
Objemová hmotnost [kg/m3]:	-				2808,5

KRA-SE-9					Průměrné hodnoty
Průměr [mm]:	38,2	38,2	38,3	38,2	38,2
Délka [mm]:	77,2	77,0	77,1	77,2	77,1
Hmotnost [g]:	246,6				246,6
Objemová hmotnost [kg/m3]:	-				2786,4

KRA-SE-10					Průměrné hodnoty
Průměr [mm]:	38,2	38,1	38,2	38,3	38,2
Délka [mm]:	77,5	77,4	77,1	77,0	77,3
Hmotnost [g]:	248,2				248,2
Objemová hmotnost [kg/m3]:	-				2802,8

KRA-S-11					Průměrné hodnoty
Průměr [mm]:	38,2	38,1	38,2	38,3	38,2
Délka [mm]:	77,1	76,9	77,2	77,2	77,1
Hmotnost [g]:	246,2				246,2
Objemová hmotnost [kg/m3]:	-				2786,0

KRA-S-12					Průměrné hodnoty
Průměr [mm]:	38,2	38,0	38,1	38,2	38,1
Délka [mm]:	77,4	77,3	77,6	77,4	77,4
Hmotnost [g]:	245,2				245,2
Objemová hmotnost [kg/m3]:	-				2774,6

KRA-S-13					Průměrné hodnoty
Průměr [mm]:	38,3	38,2	38,0	38,2	38,2
Délka [mm]:	77,2	77,4	77,7	77,4	77,4
Hmotnost [g]:	245,5				245,5
Objemová hmotnost [kg/m3]:	-				2769,8

KRA-E-14					Průměrné hodnoty
Průměr [mm]:	38,1	38,1	37,9	37,9	38,0
Délka [mm]:	77,3	77,2	77,1	77,1	77,2
Hmotnost [g]:	247,9				247,9
Objemová hmotnost [kg/m3]:	-				2831,7

[Tabulka 1] Hmotové vlastnosti zkušebních těles (pokračování)

KRA-E-15 (X)					Průměrné hodnoty
Průměr [mm]:	38,2	38,1	38,2	38,2	38,2
Délka [mm]:	77,4	77,7	77,5	77,8	77,6
Hmotnost [g]:	247,7				247,7
Objemová hmotnost [kg/m ³]:	-				2788,8

KRA-E-16					Průměrné hodnoty
Průměr [mm]:	38,2	38,3	38,3	38,2	38,3
Délka [mm]:	77,5	77,9	77,6	77,4	77,6
Hmotnost [g]:	249,6				249,6
Objemová hmotnost [kg/m ³]:	-				2799,4

KRA-E-17					Průměrné hodnoty
Průměr [mm]:	38,0	38,0	38,2	38,3	38,1
Délka [mm]:	77,1	77,2	76,9	77,2	77,1
Hmotnost [g]:	248,8				248,8
Objemová hmotnost [kg/m ³]:	-				2827,2

Vzorek KRA-E-15 nebyl pravidelného válcovitého tvaru, protože při odvrtávání byl částečně navrtán jiným (nepodařeným) vrtem. Toto těleso v dalších měřeních a výpočtech nebylo uvažováno a posloužilo pouze pro první měření v triaxiálním přístroji pro získání přibližné představy o chování této horniny.

Z objemových hmotností jednotlivých těles byly určeny jejich průměrné hodnoty, s nimiž bylo uvažováno při dalších měřeních a výpočtech. Vyšší objemová hmotnost enklávy souvisí s vyšším zastoupením mafických minerálů v rámci tohoto petrografického typu.

Objemová hmotnost syenitu:

$$\rho = 2777,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Objemová hmotnost enklávy:

$$\rho = 2806,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

3.3 Petrografický rozbor

Petrografické studium provedl autor bakalářské práce jednak na makrovzorcích pomocí stereomikroskopu Nikon SMZ 1500, jednak pomocí polarizačního mikroskopu Nikon Optiphot 2 – POL. Pro potřeby mikroskopického studia byl z kontaktu mezi enklávou a syenitem zhotoven leštěný výbrus a jeho minerální složení bylo fotodokumentováno pomocí fotoaparátu Canon EOS 1100 D, a to jak s jedním nikolem (PPL), tak se zkříženými nikoly (XPL).

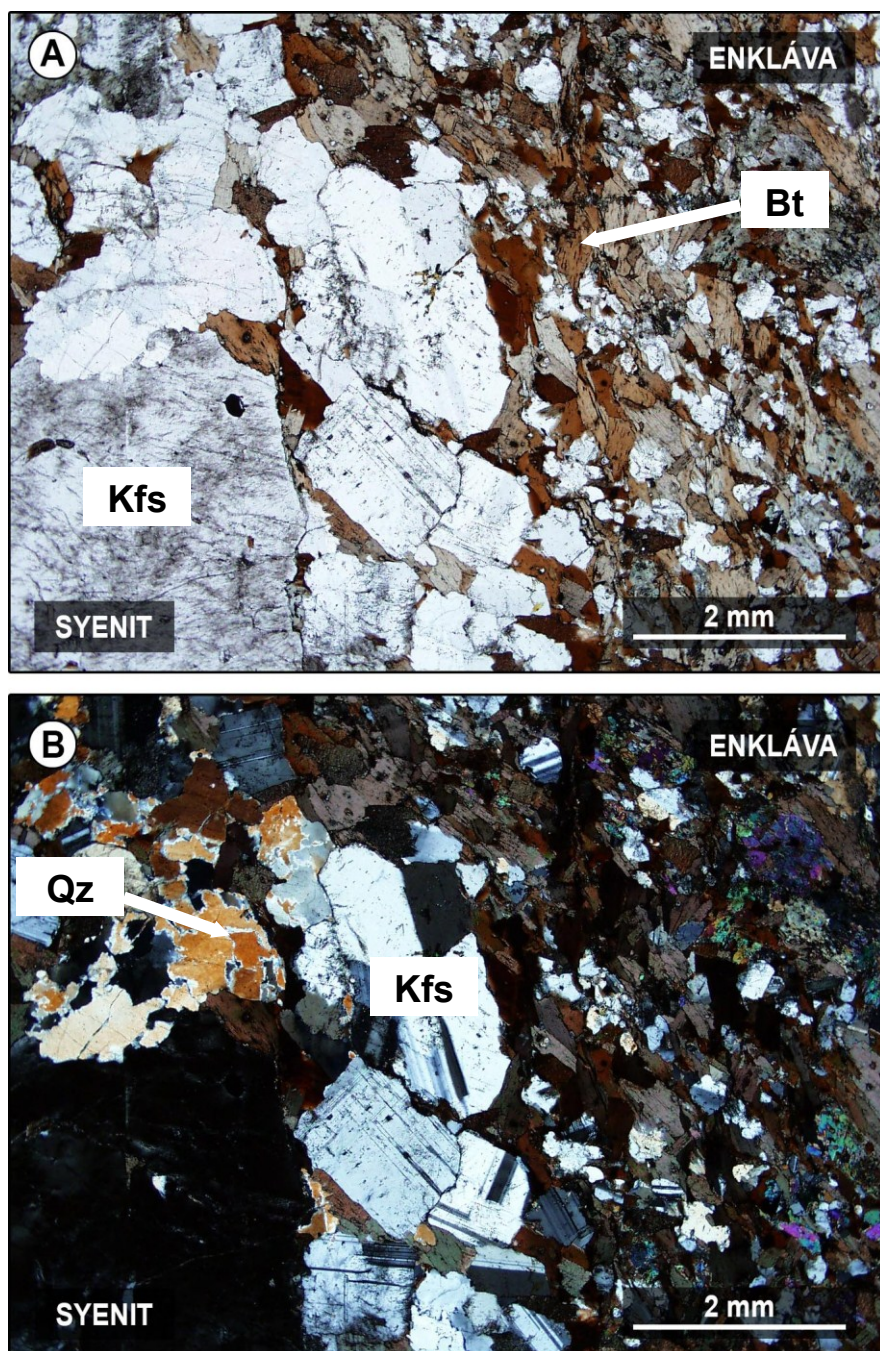


[Obr. 13] Úlomek horniny s kontaktem syenitu a enklávy pro výrobu mikroskopického vzorku

Studovaný syenit obsahuje různý podíl xenomorfního křemene, což souvisí s procesem jeho vzniku pomocí míšení acidní a mafické taveniny. Draselné živce, které vykazují typické dvojčaté srůsty podle karlovarského srůstového zákona, jsou u syenitů zonální a bývají zakaleny produkty jejich přeměn. Jednotlivé zóny jsou lemovány tmavými minerály.

Studovaná enkláva je oproti hostitelskému syenitu nápadně jemnozrnější a obsahuje velké množství proudově usměrněných lupínek biotitu, které jsou orientovány paralelně s kontaktem syenitu. V rámci enklávy lze ojediněle pozorovat větší xenokrysty draselného živce s korodovanými okraji.

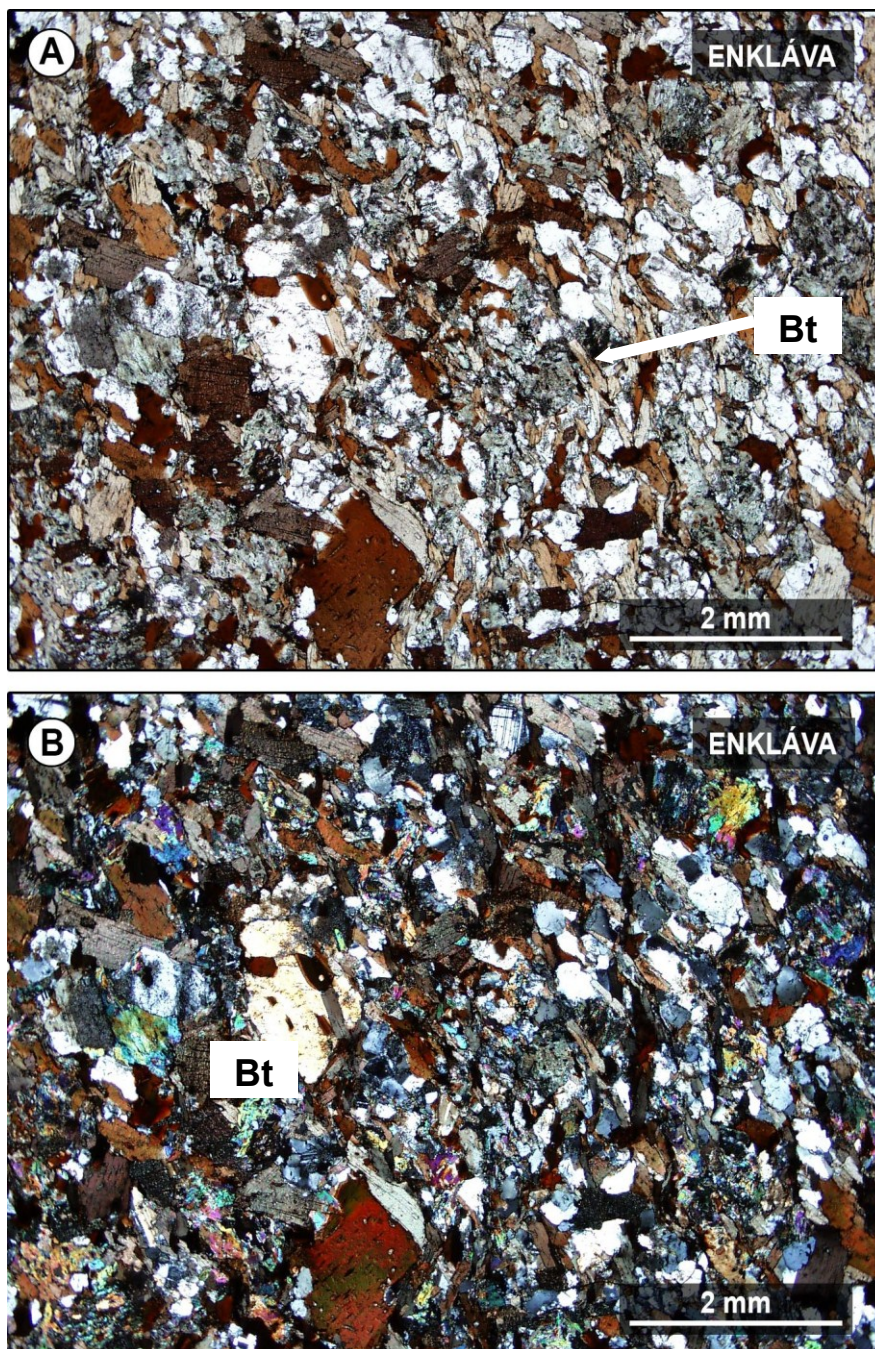
Jednotlivé minerály syenitu i enklávy obsahují velké množství uzavřených akcesorických minerálů bohatých na radioaktivní prvky, okolo kterých vznikají charakteristické pleochroické dvůrky.



[Obr. 14] Mikroskopická fotografie kontaktu syenitu a enklávy

(A): kontakt enklávy a syenitu s patrnými draselnými živci zakalenými produkty jejich přeměn (Kfs) a lupínky biotitu (Bt) usměrněnými podél kontaktu (PPL)

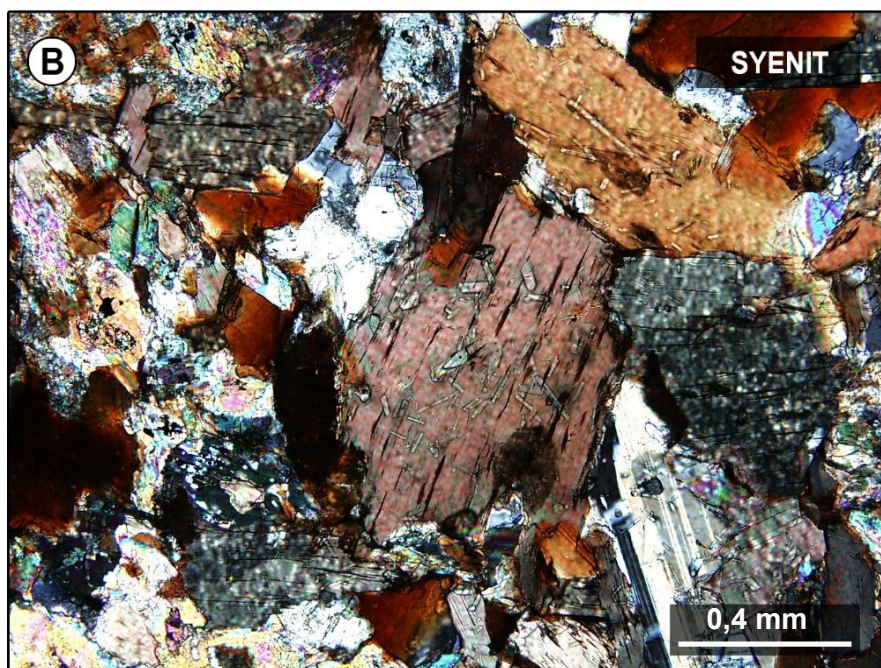
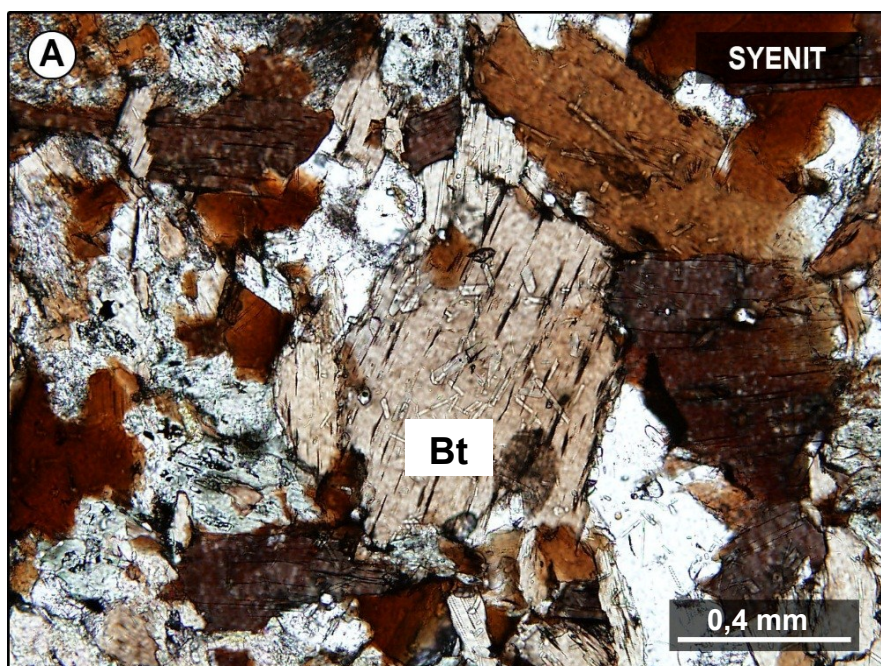
(B): stejný snímek jako (A) s patrným dvojčatěním draselného živce podél karlovarského srůstového zákona (Kfs) a xenomorfně omezeným křemenem (Qz; XPL).



[Obr. 15] Mikroskopická fotografie enklávy

(A): detail enklávy bohaté na proudově usměrněné krystaly biotitu (Bt; PPL)

(B): stejný snímek jako (A) s drsným povrchem biotitu těsně před polohou vyhasnutí (XPL)



[Obr. 16] Mikroskopická fotografie akcesorických minerálu syenitu

(A): detail biotitu s uzavřenými akcesorickými minerály bohatými na radioaktivní prvky (Bt; PPL)

(B): stejný snímek jako (A) s patrnými pleochroickými dvůrky v okolí radioaktivních minerálů (XPL)

3.4 Skleroskopická tvrdost

Měření skleroskopické tvrdosti bylo prováděno v laboratoři na balvanech položených na nepružné podložce a zafixovaných tak, aby nedocházelo k nežádoucímu pohlcení energie dopadajícího beranu měřidla. K měření bylo použito Schmidtovo kladívko typu L, které bylo před měřením řádně zkalibrováno. Byly provedeny celkem 4 série měření, z toho 2 série na mafické mikrogranulární enklávě a 2 na hostitelské hornině. Každá série obsahovala 10 měření odskoku. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v této tabulce.

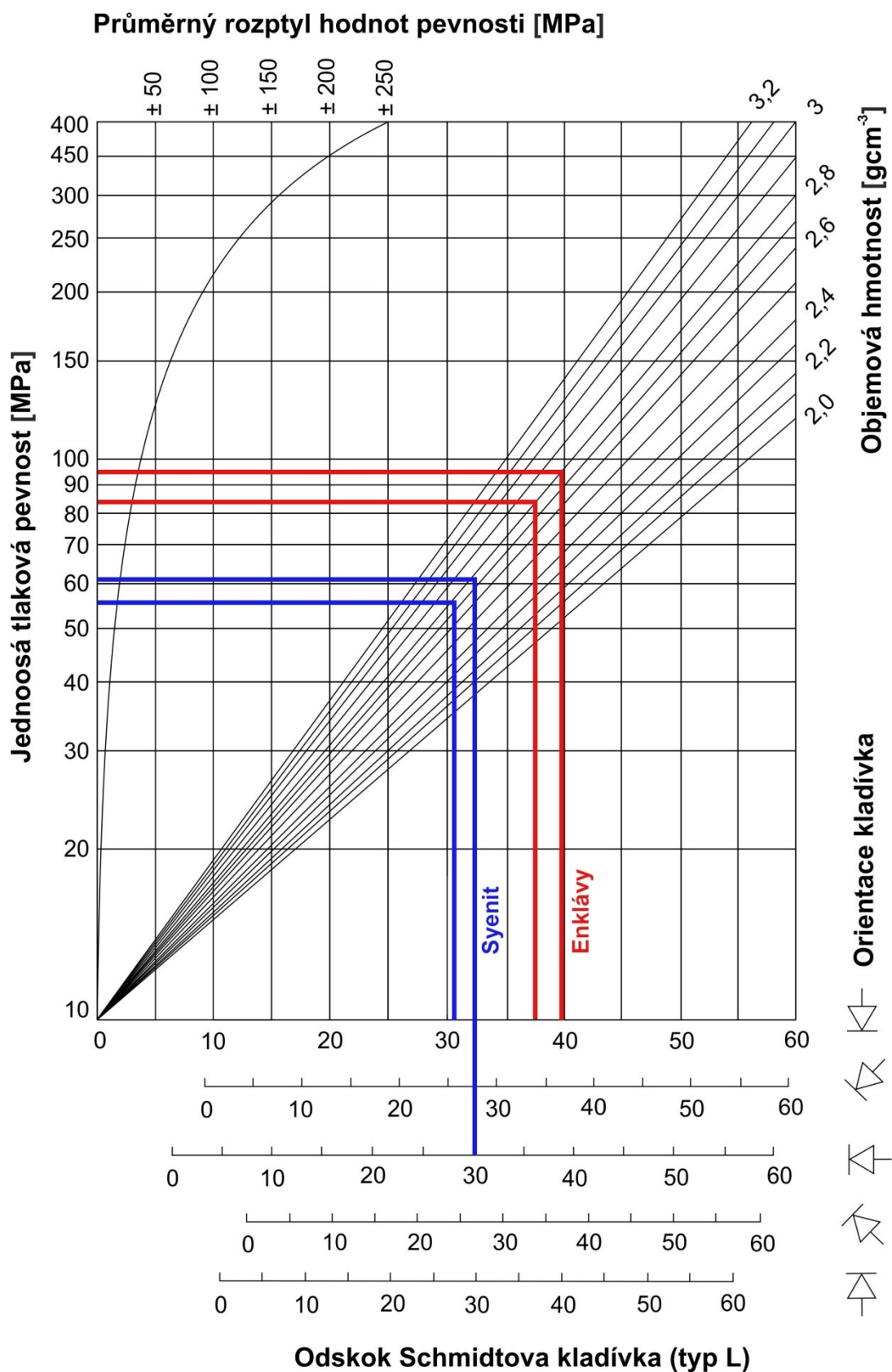
[Tabulka 2] Hodnoty odskoku Schmidtova kladívka

Vzorek a orientace zkoušky		Vzorek a orientace zkoušky	
Enkláva, svisle		Enkláva, svisle	
Č. měření	hodnoty	Č. měření	hodnoty
1	32	1	38
2	42	2	44
3	34	3	40
4	30	4	39
5	40	5	38
6	48	6	37
7	38	7	36
8	36	8	41
9	43	9	38
10	34	10	53
Průměr:	37,375	Průměr:	39,375

Vzorek a orientace zkoušky		Vzorek a orientace zkoušky	
Syenit, vodorovně		Syenit, svisle	
Č. měření	hodnoty	Č. měření	hodnoty
1	25	1	28
2	30	2	25
3	32	3	34
4	32	4	38
5	28	5	32
6	29	6	30
7	28	7	32
8	31	8	33
9	34	9	28
10	36	10	34
Průměr:	30,500	Průměr:	31,375

V každé sérii byla z naměřených hodnot vyřazena ta nejnižší a nejvyšší. Ze zbylých hodnot pak byla aritmetickým průměrem určena průměrná výsledná hodnota odskoku dané série měření. Tyto hodnoty pak byly vyneseny do diagramu

zobrazeném níže a v závislost na objemové hmotnosti byly odečteny hodnoty jednoosé tlakové pevnosti.



[Obr. 17] Naměřené hodnoty odskoku Schmidtova kladívka

První série měření na enklávách dává jednoosou tlakovou pevnost přibližně 83 MPa a druhá série měření 95 MPa. Aritmetickým průměrem těchto dvou hodnot získáme hodnotu jednoosé tlakové pevnosti enkláv

$$\sigma_s = 89,0 \text{ Mpa}$$

První série měření na syenitech dává jednoosou tlakovou pevnost přibližně 56 MPa a druhá série měření 61 MPa. Aritmetickým průměrem těchto dvou hodnot získáme hodnotu jednoosé tlakové pevnosti syenitu

$$\sigma_s = 58,5 \text{ Mpa}$$

3.5 Pevnost v příčném tahu

Pevnost v příčném tahu, známá též jako brazilská zkouška, byla měřena na válcových tělesech.

Při testování byla zvolena zatěžovací rychlost 200 N/s, takže k porušení zkušebního tělesa došlo přibližně po třech až čtyřech minutách zatěžování. Z maximální dosažené síly pak byla dle vztahu $\sigma_{\text{Ptp}} = 0,637 \frac{F}{d \cdot l}$ vypočtena hodnota tahové pevnosti. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce níže.

[Tabulka 3] Měření pevnosti v příčném tahu

KRA-E-4		Dosažená síla [kN]	Tahová pevnost [MPa]
Průměr [mm]:	54,6	42,99	8,960
Délka [mm]:	56,0		
Hmotnost [g]:	366,0		
Objemová hmotnost [kg/m ³]:	2791,3		

KRA-E-5		Dosažená síla [kN]	Tahová pevnost [MPa]
Průměr [mm]:	54,6	42,76	8,877
Délka [mm]:	56,2		
Hmotnost [g]:	365,8		
Objemová hmotnost [kg/m ³]:	2781,2		

KRA-S-6		Dosažená síla [kN]	Tahová pevnost [MPa]
Průměr [mm]:	54,8	44,26	9,237
Délka [mm]:	55,7		
Hmotnost [g]:	363,4		
Objemová hmotnost [kg/m ³]:	2766,2		

[Tabulka 3] Měření pevnosti v příčném tahu (pokračování)

KRA-S-7		Dosažená síla [kN]	Tahová pevnost [MPa]
Průměr [mm]:	54,9	46,12	9,625
Délka [mm]:	55,6		
Hmotnost [g]:	364,0		
Objemová hmotnost [kg/m ³]:	2765,6		

KRA-E-8		Dosažená síla [kN]	Tahová pevnost [MPa]
Průměr [mm]:	38,1	29,28	13,887
Délka [mm]:	35,3		
Hmotnost [g]:	112,8		
Objemová hmotnost [kg/m ³]:	2808,5		

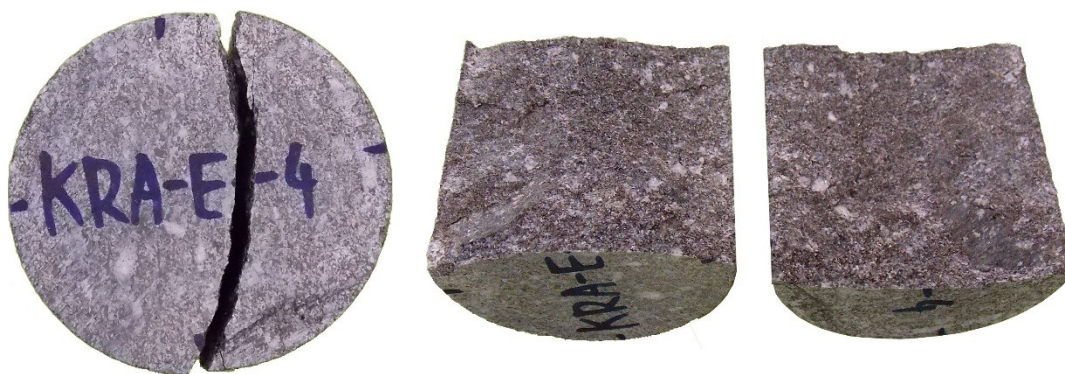
Aritmetickým průměrem z vypočtených tahových pevností enkláv pak můžeme stanovit tahovou pevnost enkláv:

$$\sigma_{\text{Ptp}} = 10,575 \text{ MPa}$$

Aritmetickým průměrem z vypočtených tahových pevností syenitů lze stanovit tahovou pevnost syenitu:

$$\sigma_{\text{Ptp}} = 9,431 \text{ Mpa}$$

Na fotografiích níže jsou tělesa po porušení. Všechny tělesa se vlivem normálových tahových napětí porušila podélnou trhlinou, která půlila vzorky na dvě téměř stejné poloviny.



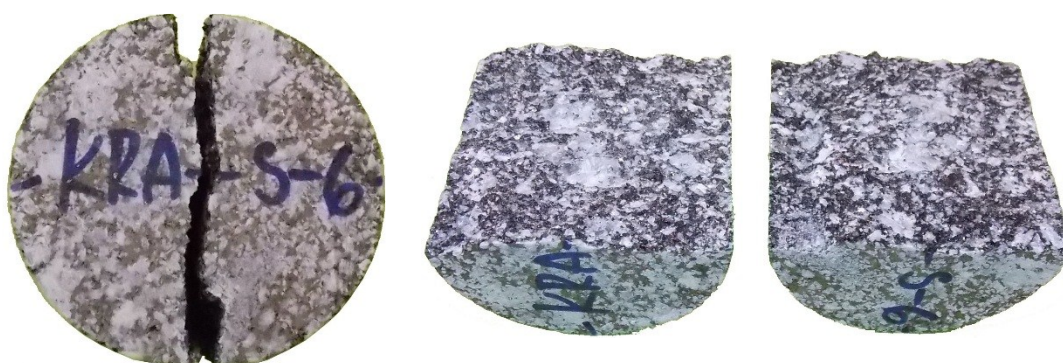
Vzorek enklávy KRA-E-4, tahová pevnost 8,960 MPa



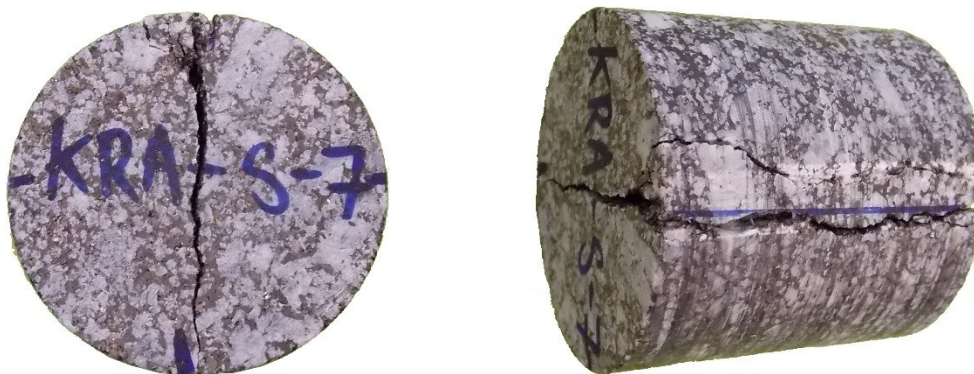
Vzorek enklávy KRA-E-5, tahová pevnost 8,877 MPa



Vzorek enklávy KRA-E-8, tahová pevnost 13,887 MPa



Vzorek syenitu KRA-S-6, tahová pevnost 9,237 MPa



Vzorek syenitu KRA-S-7, tahová pevnost 9,625 MPa

[Obr. 18] Zkušební tělesa po zkoušce v příčném tahu.

3.6 Pevnost v jednoosém tlaku

Pevnost v jednoosém tlaku byla měřena na tělese KRA-S-2, které bylo tvořeno pouze syenitem a tělesech KRA-SE-1 a KRA-SE-3 které obsahovaly kontakt enklávy s hostitelskou horninou syenitem.

[Tabulka 4] Měření pevnosti v jednoosém tlaku

KRA-SE-1		Dosažená síla [kN]	Tlaková pevnost [MPa]
Průměr [mm]:	54,3	291,622	126,046
Délka [mm]:	108,7		
Hmotnost [g]:	709,7		
Objemová hmotnost [kg/m ³]:	2821,5		

KRA-S-2		Dosažená síla [kN]	Tlaková pevnost [MPa]
Průměr [mm]:	54,7	233,238	99,251
Délka [mm]:	108,1		
Hmotnost [g]:	711,9		
Objemová hmotnost [kg/m ³]:	2803,7		

KRA-SE-3		Dosažená síla [kN]	Tlaková pevnost [MPa]
Průměr [mm]:	54,5	231,553	99,441
Délka [mm]:	108,2		
Hmotnost [g]:	701,0		
Objemová hmotnost [kg/m ³]:	2781,7		

Naměřená hodnota jednoosé tlakové pevnosti syenitu:

$$\sigma = 99,251 \text{ MPa}$$

Z naměřených hodnot je patrné že přítomnost enkláv neměla negativní vliv na jednoosou tlakovou pevnost. Vzorky s enklávou dosáhly buď podobné anebo vyšší pevnosti než zkušební těleso tvořené pouze syenitem.



Vzorek kontaktu syenitu a enklávy KRA-SE-1, porušený při jednoosé tlakové zkoušce



Vzorek syenitu KRA-S-2, porušený při jednoosé tlakové zkoušce



Vzorek kontaktu syenitu a enklávy KRA-SE-3, porušený při jednoosé tlakové zkoušce

[Obr. 19] Zkušební tělesa po jednoosé tlakové zkoušce.

Vzorky se porušily systémem několika svislých a šikmých trhlin. Porušení se blížilo charakteristickému tvaru přesýpacích hodin, které je pro jednoosé tlakové zkoušky typické.

3.7 Triaxiální pevnost

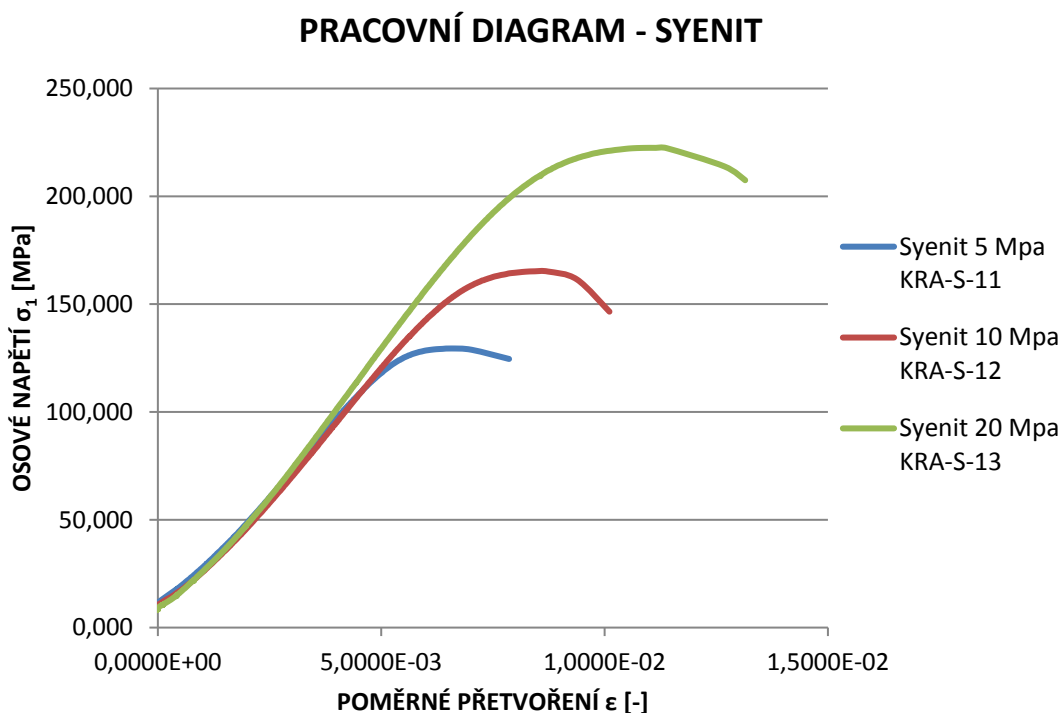
Měření bylo realizováno na moderním triaxiálním přístroji ADVANTEST 9 ROCK od italského výrobce Controls Group umístěném ve vědecko-výzkumném centru AdMaS. Zkoušky byly prováděny jak v režimu řízeném silou, tak deformací. Svislá deformace byla vždy měřena trojicí mikrometrických LVDT snímačů.

Všechna zkušební tělesa měla přibližně stejný tvar válce o průměru 38 mm a výšce 77 mm. První sada zkušebních těles KRA-S-11 až KRA-S-13 byla tvořena pouze syenitem. Další sada měření obsahovala tělesa KRA-E-14 až KRA-E-17 tvořená enklávou. Na závěr byla testována tělesa s kontaktem syenitu a enklávy KRA-SE-9 a KRA-SE-10.

3.7.1 Triaxiální pevnost syenitu

Měření bylo provedeno na třech tělesech s různými komorovými tlaky 5 MPa, 10 MPa a 20 MPa a zkouška byla řízena silou. Rychlost zatěžování osovou silou byla 0,5 kN/s. V závislosti na čase byly měřeny celkem tři veličiny, jednalo se o osovou sílu, komorový tlak a svislou deformaci.

Z osově síly a plochy testovaného tělesa bylo následně vypočteno osově napětí σ_1 a z průměrné deformace naměřené LVDT snímači a výšky vzorku bylo vypočteno poměrné přetvoření ϵ . Závislost napětí na poměrném přetvoření je vykreslena jako pracovní diagram.



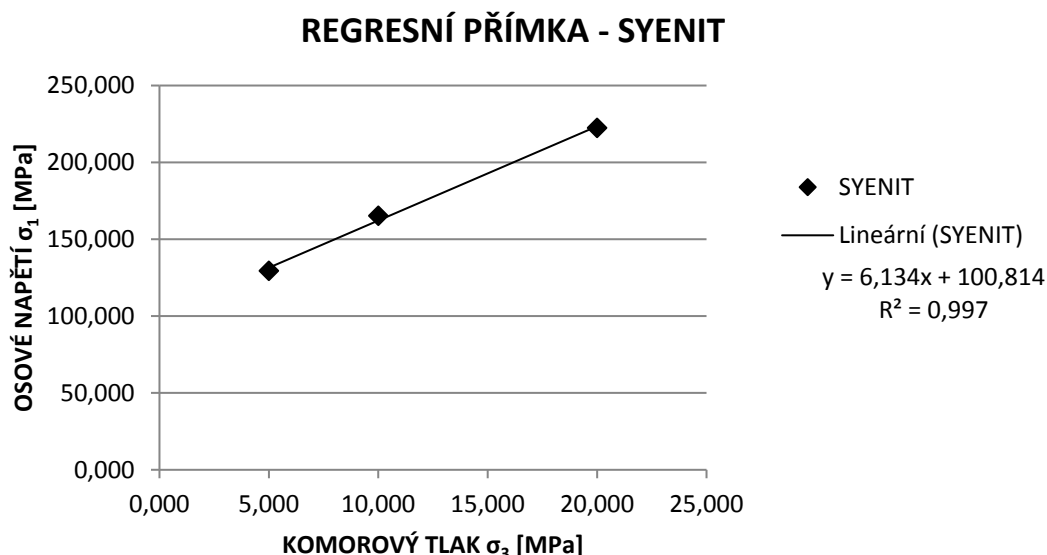
[Obr. 20] Pracovní diagramy syenitu z triaxiální zkoušky

Maximální dosažené napětí u jednotlivých testovaných vzorků je spolu s odpovídajícími komorovými tlaky uvedeno v této tabulce.

[Tabulka 5] Triaxiální pevnost syenitu

Označení vzorku	σ_3 [MPa]	σ_1 [MPa]
KRA-S-11	5,000	129,440
KRA-S-12	10,000	165,220
KRA-S-13	20,000	222,472

Z těchto hodnot je zřejmé, že napětí σ_1 roste úměrně komorovému tlaku σ_3 . Tohoto faktu bylo využito k sestrojení korelačního grafu, kdy na vodorovné ose jsou hodnoty komorových tlaků a na svislé ose hodnoty osových napětí. Vynesení body poté byla metodou lineární regrese proložena přímka.



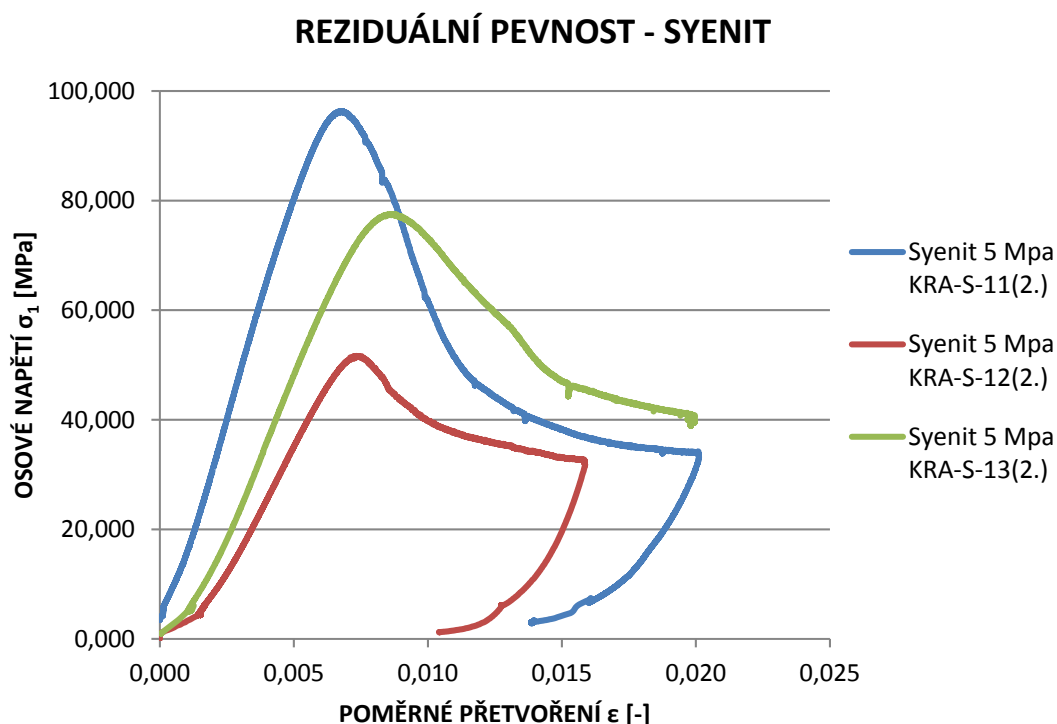
[Obr. 21] Regresní přímka triaxiálních pevností syenitu

Pokud do rovnice regresní přímky $y = 6,134x + 100,814$ dosadíme za x nulu, dostaneme hodnotu jednoosé tlakové pevnosti syenitu odvozené ze série tří triaxiálních zkoušek:

$$\sigma_{corr} = 100,814 \text{ Mpa}$$

Díky tomu, že zkouška byla řízena silou, byl test po dosažení maximálního napětí automaticky ukončen, proto nebylo možné sledovat pokles napětí až na reziduální mez. Protože na vzorcích nebylo ještě patrné žádné makroskopické porušení, byly znova vloženy do triaxiálního přístroje a testovány právě za účelem zjištění reziduální pevnosti.

Zkoušky byly nyní řízeny deformací s konstantní rychlostí přírůstků deformace 1 $\mu\text{m/s}$. Komorový tlak byl zvolen 5 MPa shodně pro všechny tři měření. Naměřené hodnoty jsou vyneseny v pracovním diagramu na obrázku 22.



[Obr. 22] Pracovní diagramy z měření reziduálních pevností syenitu

Přibližné hodnoty ustálených osových napětí a tomu odpovídající poměrná přetvoření jsou uvedeny v této tabulce.

[Tabulka 6] Reziduální pevnost syenitu

Označení vzorku	σ_1 [MPa]	ε [-]
KRA-S-11	33,000	0,020114
KRA-S-12	32,800	0,015839
KRA-S-13	39,500	0,019948

Aritmetickým průměrem z těchto hodnot pak byla stanovena průměrná hodnota reziduální pevnosti syenitu:

$$\sigma_r = 35,100 \text{ Mpa}$$

Na fotografiích níže jsou porušené vzorky. U všech těles se porušení projevilo jako úhlopříčná trhlina. Na těchto plochách porušení docházelo vlivem vysokých dosažených deformací k velkému drcení a rozrušení horniny.



Vzorek syenitu KRA-S-11, porušený při měření reziduální pevnosti



Vzorek syenitu KRA-S-12, porušený při měření reziduální pevnosti



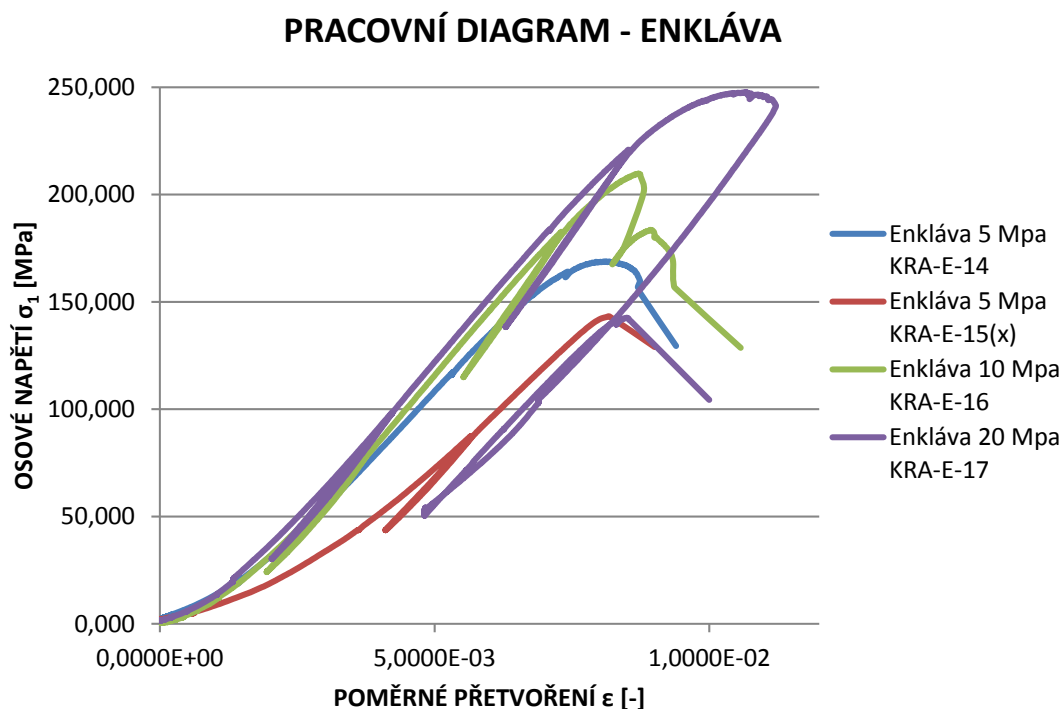
Vzorek syenitu KRA-S-13, porušený při měření reziduální pevnosti

[Obr. 23] Zkušební tělesa syenitu po triaxiální zkoušce

3.7.2 Triaxiální pevnost enkláv

Měření triaxiální pevnosti na enklávách bylo řízeno deformací s konstantním přírůstkem deformace 1 $\mu\text{m/s}$. Měření probíhalo při třech různých komorových tlacích 5 MPa, 10 MPa a 20 MPa.

Vzorek označený jako KRA-E-15(x) díky špatnému odvrtání nebyl pravidelného válcového tvaru a z průběhu pracovního diagramu je patrné, že tento fakt měření výrazně ovlivnil, proto s tímto měřením nebylo v dalších výpočtech uvažováno.



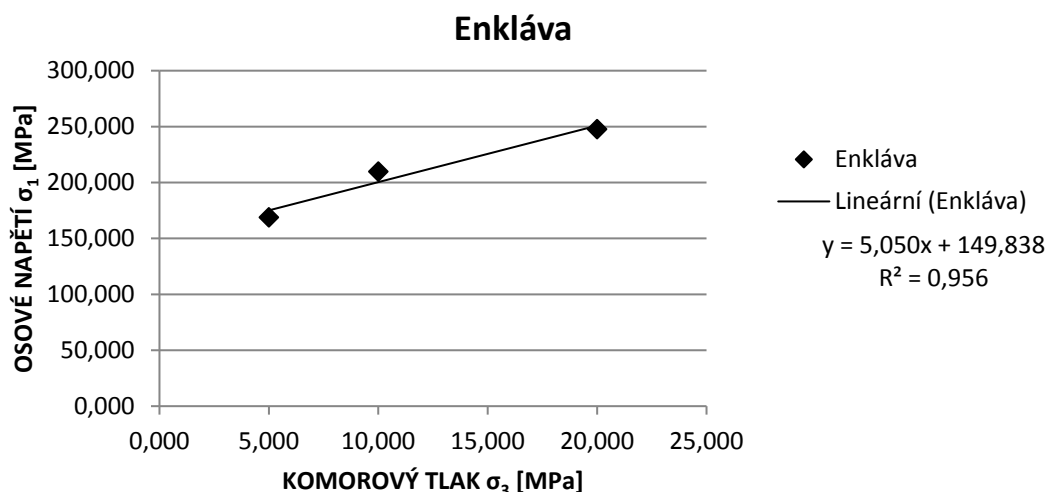
[Obr. 24] Pracovní diagramy enkláv z triaxiálních zkoušek

Maximální dosažené napětí u jednotlivých testovaných vzorků je spolu s odpovídajícími komorovými tlaky uvedeno v následující tabulce.

[Tabulka 7] Triaxiální pevnosti enkláv

Označení vzorku	σ_3 [MPa]	σ_1 [MPa]
KRA-E-14	5,000	168,829
KRA-E-15(x)	5,000	143,185
KRA-E-16	10,000	209,733
KRA-E-17	20,000	247,714

Pro zjištění jednoosé tlakové pevnosti byl použit stejný postup jako u vzorků syenitu. Opět byly vyneseny jednotlivé maximální dosažené tlakové napětí v závislosti na odpovídajícím komorovém tlaku a těmito body byla proložena regresní přímka.



[Obr. 25] Regresní přímka triaxiálních pevností enklávy

Pokud do rovnice regresní přímky $y = 5,050x + 149,838$ dosadíme za x nulu, dostaneme hodnotu jednoosé tlakové pevnosti enkláv odvozené ze série tří triaxiálních zkoušek:

$$\sigma_{corr} = 149,838 \text{ Mpa}$$

U vzorků KRA-E-16 a KRA-E-17 byly v průběhu zkoušky provedeny dvě odtlížení, díky kterým bylo možné odečíst plastické deformace a vypočítat moduly pružnosti dle vztahu:

$$E = \frac{\sigma_{1,1} - \sigma_{2,5}}{\frac{\varepsilon_{a1} + \varepsilon_{a3}}{2} - \varepsilon_{a2}}$$

Hodnoty odečtených napětí, poměrných přetvoření a z nich vypočtených modulů pružnosti jsou zapsány v tabulce níže.

[Tabulka 8] Moduly pružnosti enklávy

KRA-E-16					
$\sigma_{1,3}$ [MPa]	$\sigma_{2,5}$ [MPa]	ε_{a1} [-]	ε_{a2} [-]	ε_{a3} [-]	E [GPa]
77,998	24,233	0,0037504	0,0019489	0,0037616	29,752
182,658	114,883	0,0073063	0,0055245	0,73522	37,554

KRA-E-17					
$\sigma_{1,3}$ [MPa]	$\sigma_{2,5}$ [MPa]	ε_{a1} [-]	ε_{a2} [-]	ε_{a3} [-]	E [GPa]
98,519	30,326	0,0042304	0,0020385	0,0042391	31,049
220,918	138,244	0,0085270	0,0062931	0,0085897	36,496

Aritmetickým průměrem byl stanoven modul pružnosti enklávy:

$$E = 33,706 \text{ GPa}$$

Na fotografiích níže jsou porušená tělesa. Trhlina opět proběhla po uhlopříčce vzorku a k porušení došlo křehkým lomem za doprovodu hlasitého zvuku prasknutí.



Vzorek enklávy KRA-E-14, porušený při triaxiální zkoušce



Vzorek enklávy KRA-E-16, porušený při triaxiální zkoušce



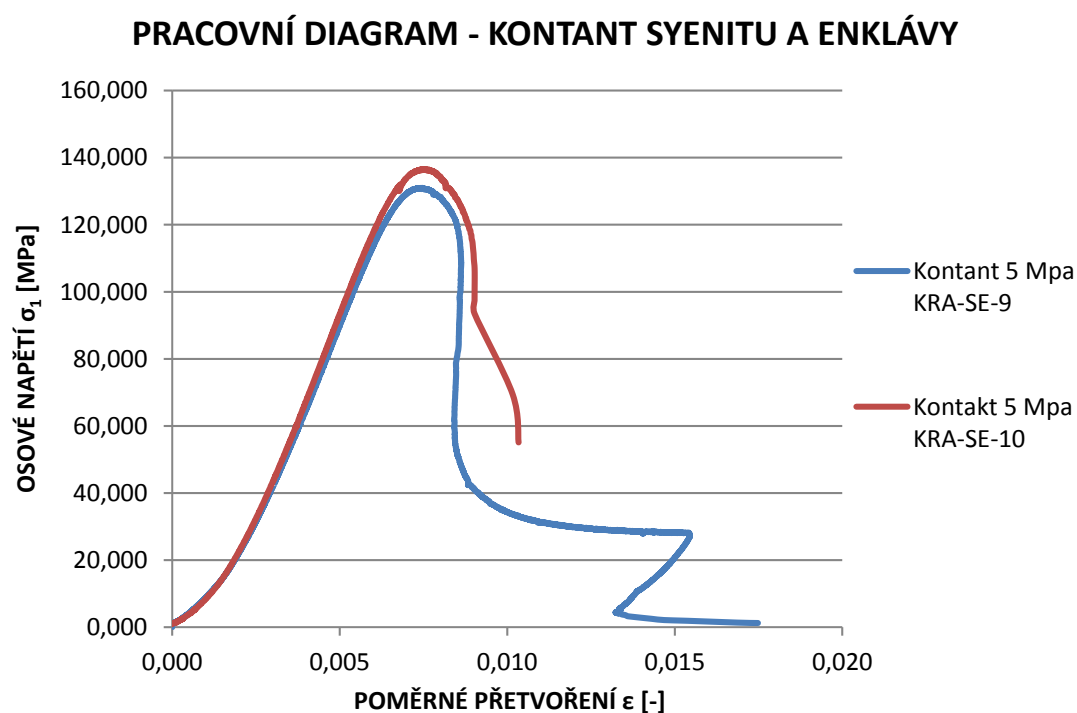
Vzorek enklávy KRA-E-17, porušený při triaxiální zkoušce

[Obr. 26] Zkušební tělesa enkláv po triaxiální zkoušce

3.7.3 Triaxiální pevnost kontaktu syenit-enkláva

Na závěr byla testována dvě tělesa složené jak z enklávy, tak z hostitelské horniny syenitu. Jednalo se o těleso KRA-SE-9, kde enkláva zaujímala přibližně 20 % objemu a těleso KRA-SE-10, kde enkláva zaujímala až 70 % objemu vzorku.

Tento typ těles byl testován zejména pro to, aby se zkoumal vliv a pevnost kontaktu syenitu s enklávou, takže nás více než dosažené maximální hodnoty pevnosti zajímal průběh a tvar porušení vzorku po zkoušce. Proto byly zkoušky opět řízeny deformací, s konstantním přírůstkem deformace 1 $\mu\text{m/s}$ a oba vzorky byly zatěžovány za shodného komorového tlaku 5 MPa.



[Obr. 27] Pracovní diagramy kontaktů syenitů a enkláv z triaxiálních zkoušek

Maximální dosažené napětí u jednotlivých testovaných vzorků je spolu s odpovídajícími komorovými tlaky uvedeno v této tabulce.

[Tabulka 9] Triaxiální pevnosti enkláv

Označení vzorku	σ_3 [MPa]	σ_1 [MPa]
KRA-SE-9	5,000	131,017
KRA-SE-10	5,000	136,605

Z naměřených dat vyplývá, že vyšší pevnosti bylo dosaženo u vzorku KRA-SE-10, který obsahoval větší podíl enklávy. To je způsobeno výrazně vyšší pevností enklávy oproti syenitu. Zároveň obě hodnoty jen nepatrně převyšují triaxiální pevnosti syenitu při komorovém tlaku 5 MPa, která byla 129,440 MPa.

U vzorku KRA-SE-9 se v závěru testu nechalo osově napětí klesnout až na reziduální hodnotu, která se ustálila na 32,400 MPa. Tato hodnota se s jistou tolerancí opět shoduje s hodnotou zjištěnou u těles tvořenou pouze syenitem.

Z průběhu porušení na testovaných vzorcích je patrné, že plocha kontaktu syenitu a enklávy není oslabením a netvoří predisponovanou plochu porušení. V obou případech mělo porušení tvar úhlopříčné trhliny, která probíhala hlavně v méně pevném syenitu.



Vzorek s kontaktem syenitu a enklávy KRA-SE-9, porušený při triaxiální zkoušce



Vzorek kontaktu syenitu a enklávy KRA-SE-10, porušený při triaxiální zkoušce

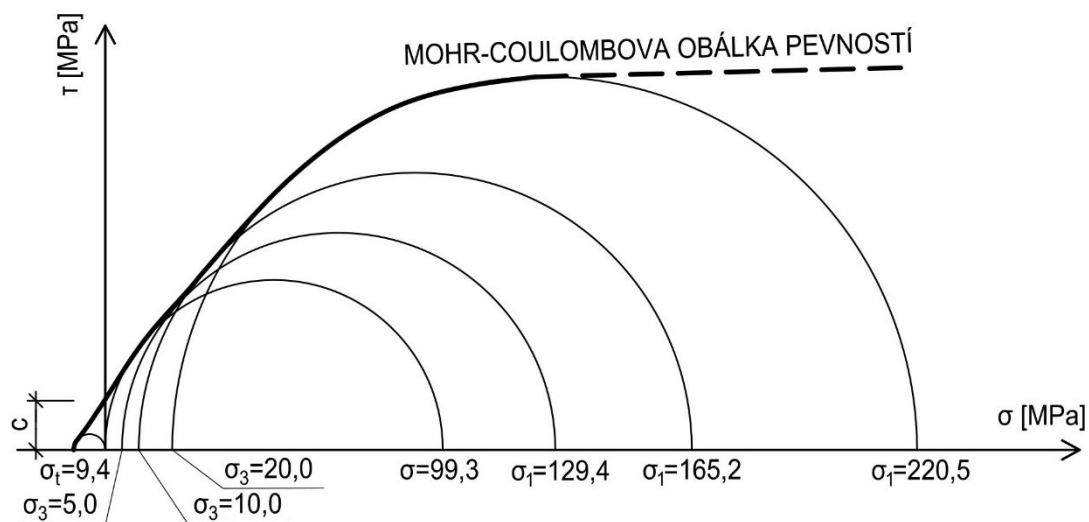
[Obr. 28] Zkušební tělesa enkláv po triaxiální zkoušce

3.8 Mohr-Coulombova podmínka porušení

Z naměřených hodnot jednoosých a triaxiálních tlakových pevností autor sestrojil Mohrovy kružnice a obálku smykových pevností. Na rozdíl od zemin není tato obálka přímka, ale tvoří ji křivka. Úhel vnitřního tření tedy není konstantní, ale klesá s rostoucím komorovým tlakem.

Obálka smykových pevností pro syenit je vykreslena na obrázku níže. Z toho digramu byla také odečtena hodnota soudržnosti:

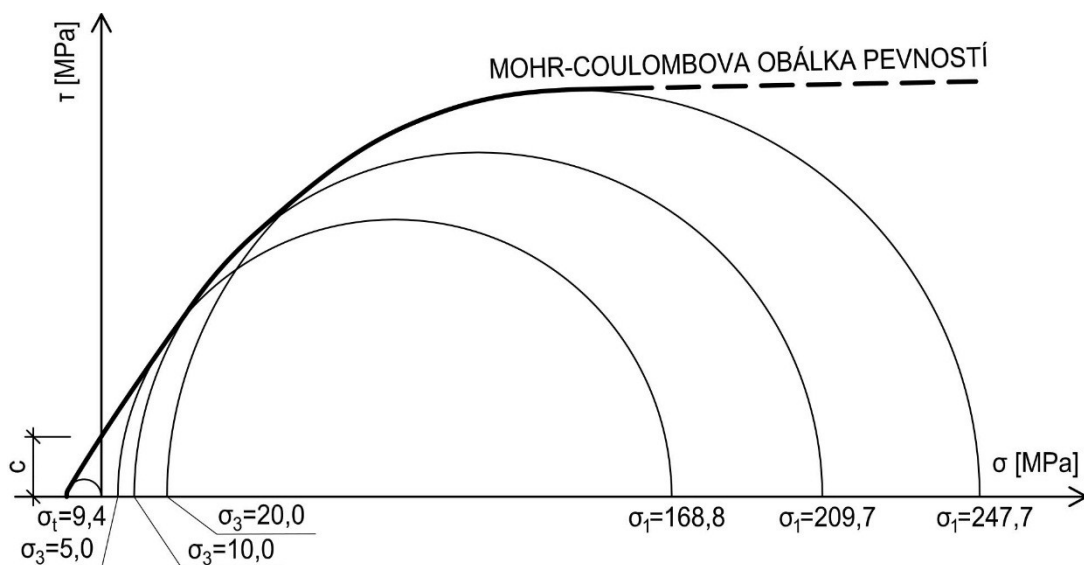
$$c = 15,1 \text{ Mpa}$$



[Obr. 29] Mohr-Coulombova obálka pevností pro syenit

Obálka smykových pevností pro enklávu je vykreslena na obrázku níže. Z toho digramu byla také odečtena hodnota soudržnosti:

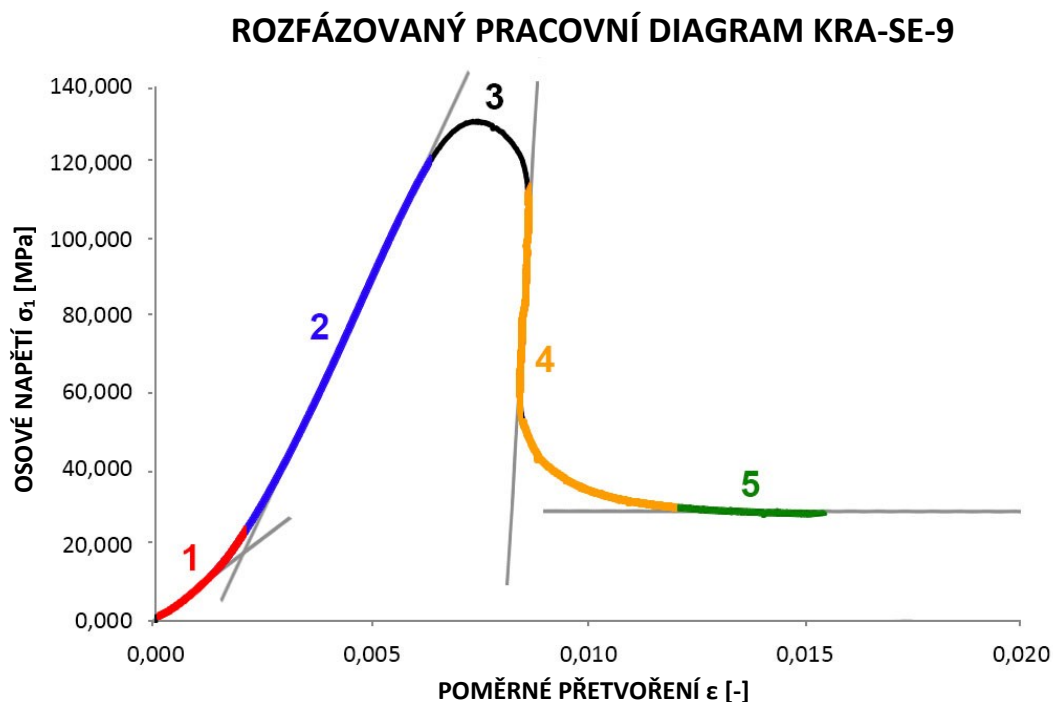
$$c = 18,3 \text{ Mpa}$$



[Obr. 30] Mohr-Coulombova obálka pevností pro enklávu

3.9 Charakteristický tvar pracovního diagramu

Syenity i enklávy měly při zatěžování dost podobné chování které lze rozdělit do několika charakteristických fází. Tyto fáze jsou znázorněny na pracovním diagramu vzorku KRA-SE-9 z triaxiální zkoušky při komorovém tlaku 5 MPa. Znalost takto obecného chování materiálu je velice důležitá například pro volbu a kalibraci vhodného konstitutivního modelu pro numerické modelování.



[Obr. 31] Rozfázovaný pracovní diagram z triaxiální zkoušky

- Fáze 1 - Materiál se chová nelineárně a dochází k postupnému zpevňování. V důsledku toho roste tuhost materiálu a křivka pracovního diagramu se napřimuje. To je způsobeno z části mineralogickým složením, kdy minerály obsahují velké množství vnitřních defektů a z části také mikrotrhlinami v hornině.
- Fáze 2 - Po zpevnění se materiál začne chovat lineárně až do oblasti těsně před porušením.
- Fáze 3 - Jedná se o oblast maximální pevnosti, kde dochází k porušení vzorku. V této oblasti se materiál chová nelineárně a dochází zde k velkém přírůstku deformací za relativně malého přírůstku napětí.
- Fáze 4 - Po porušení dochází ke změkčování materiálu, které je způsobeno postupným rozvojem trhlin. Pevnost se zvolna ustaluje na své reziduální hodnotě

Fáze 5 - Je dosaženo reziduální pevnosti. Při této pevnosti již napětí není závislé na deformaci a jeho hodnota zůstává konstantní při libovolně velkém přetvoření.

3.10 Kalibrace Mohr-Coulombova konstitutivního modelu

Na výsledky triaxiálních zkoušek autor kalibroval Mohr-Coulombův materiálový model (M-C model). Jedná se o elastický-perfektně plastický model dobře známý z mechaniky zemin. Pro 2D aplikace k jeho popisu stačí pouze tři veličiny, jedná se o modul pružnosti, soudržnost a úhel vnitřního tření. V rámci této práce byly zjištěny právě tyto tři veličiny, a to jak pro enklávu, tak pro hostitelskou horninu syenit.

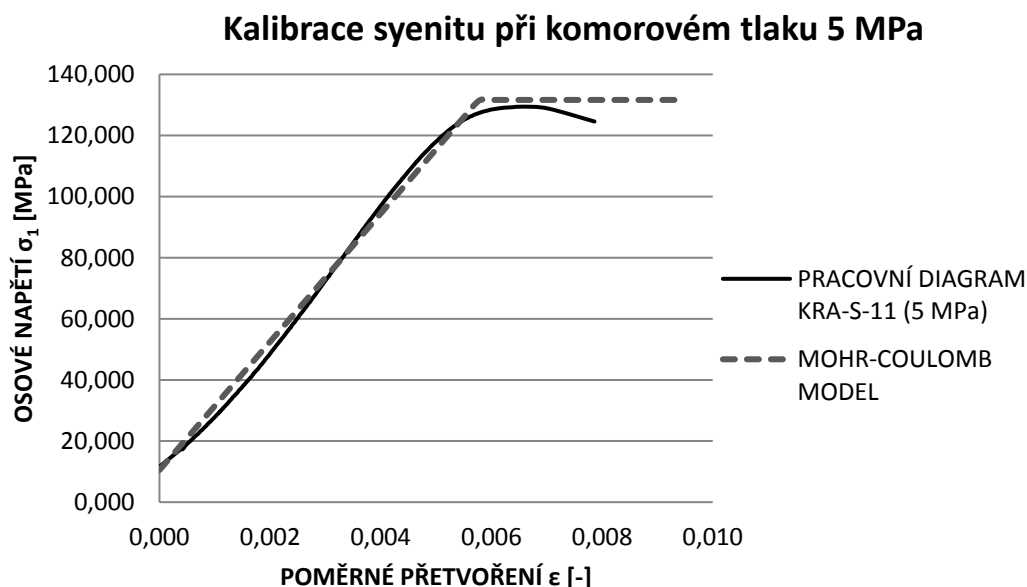
Kalibrace probíhala v aplikaci Soiltest, která je součástí programu PLAXIS 2D. Soiltest umožňuje na konstitutivních modelech simulovat průběh laboratorních zkoušek na úrovni jednoho napětového bodu a na základě tohoto průběhu pak může uživatel upravovat parametry materiálu dokud se průběh simulované zkoušky nepřiblíží skutečnému průběhu laboratorní zkoušky.

3.10.1 Kalibrace syenitu

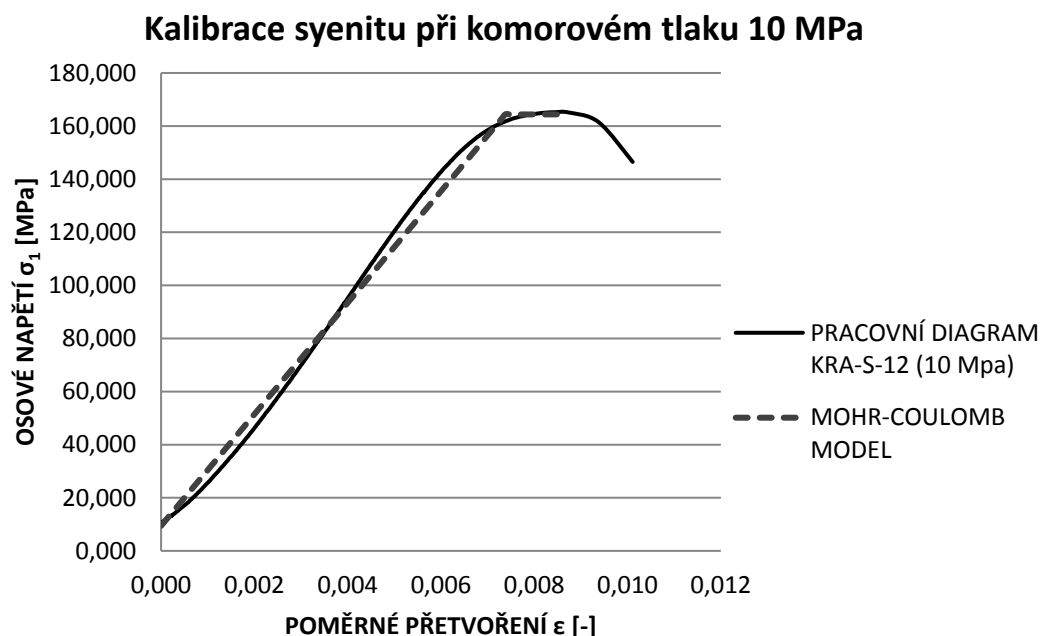
Parametry Mohr-Coulombova materiálového modelu pro simulovanou triaxiální zkoušku byly sledující:

Úhel vnitřního tření	$\varphi = 50^\circ$
Soudržnost	$c = 18 \text{ MPa}$
Modul pružnosti	$E = 21 \text{ GPa}$

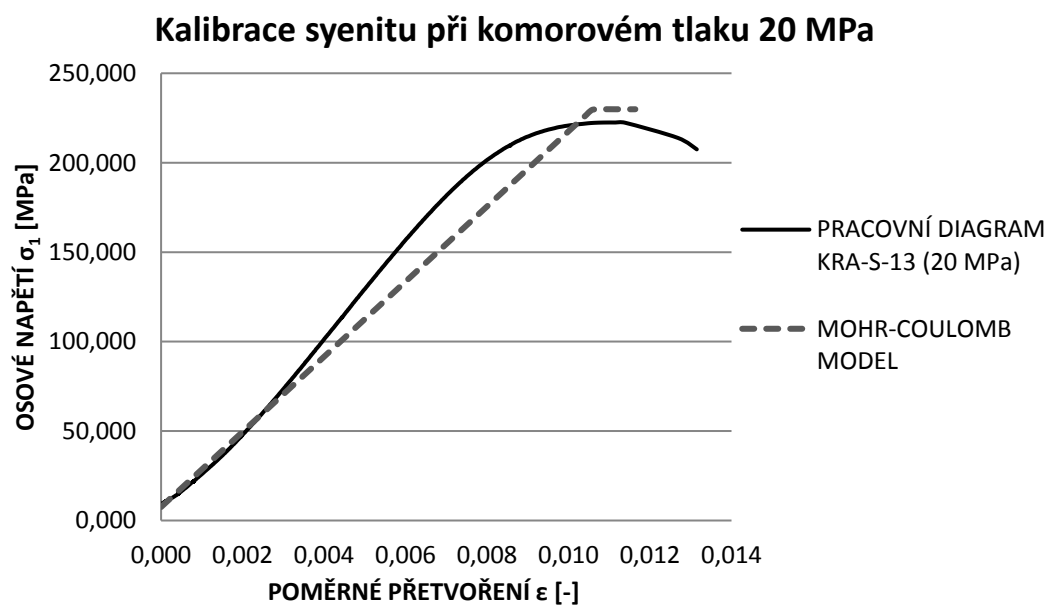
Níže jsou grafy, ve kterých je vždy pracovní diagram simulované laboratorní zkoušky z aplikace Soiltest při výše uvedených vstupních parametrech a pracovní diagram triaxiální zkoušky realizované v laboratoři.



[Obr. 32] Graf z kalibrace M-C modelu, syenit, komorový tlak 5 MPa



[Obr. 33] Graf z kalibrace M-C modelu, syenit, komorový tlak 10 MPa



[Obr. 34] Graf z kalibrace M-C modelu, syenit, komorový tlak 20 MPa

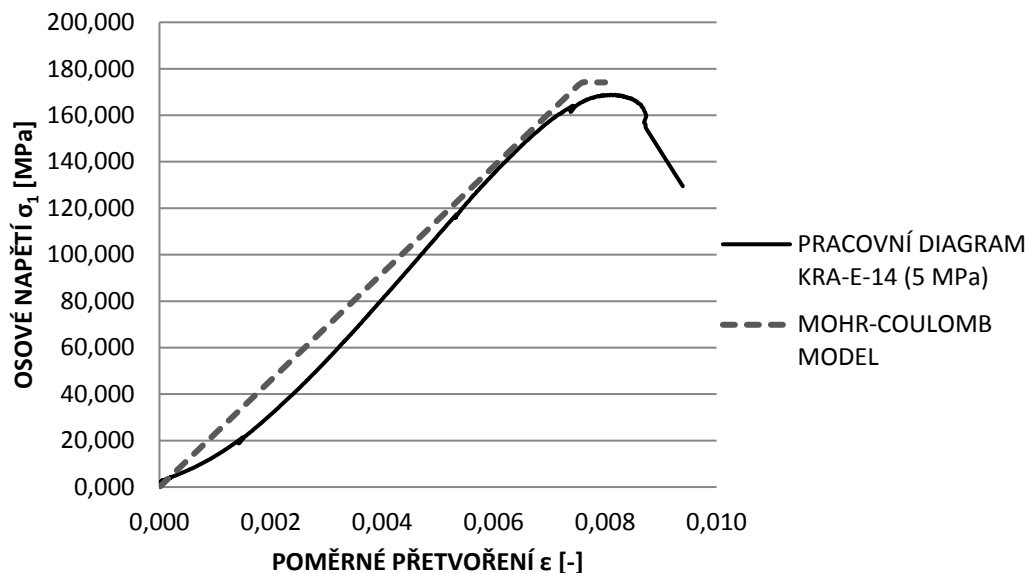
3.10.2 Kalibrace enklávy

Parametry Mohr-Coulombova materiálového modelu pro simulovanou triaxiální zkoušku byly sledující:

Úhel vnitřního tření	$\varphi = 46^\circ$
Soudržnost	$c = 30 \text{ MPa}$
Modul pružnosti	$E = 23 \text{ GPa}$

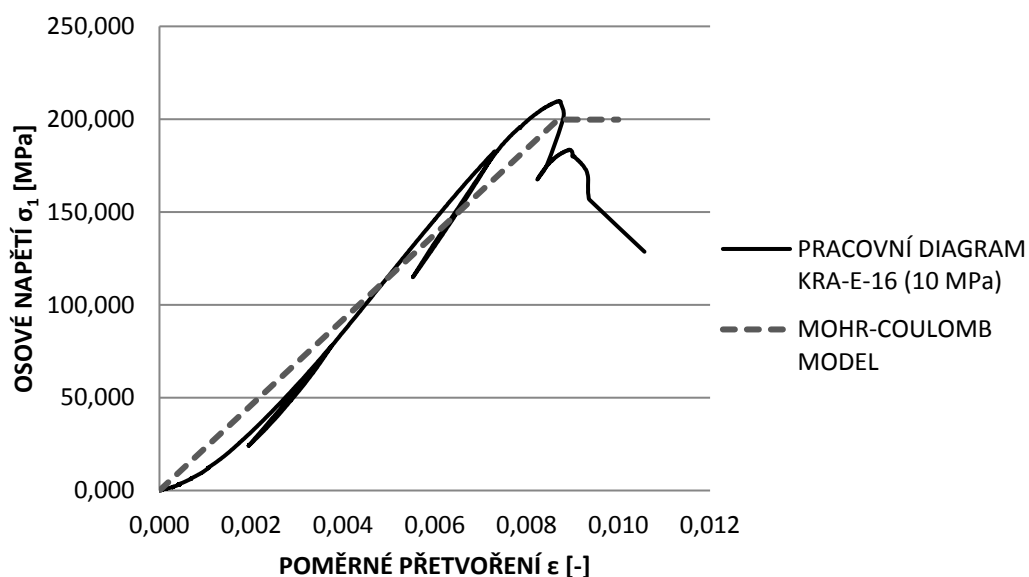
Níže jsou grafy, ve kterých je vždy pracovní diagram simulované laboratorní zkoušky z aplikace Soiltest při výše uvedených vstupních parametrech a pracovní diagram triaxiální zkoušky realizované v laboratoři.

Kalibrace enklávy při komorovém tlaku 5 MPa

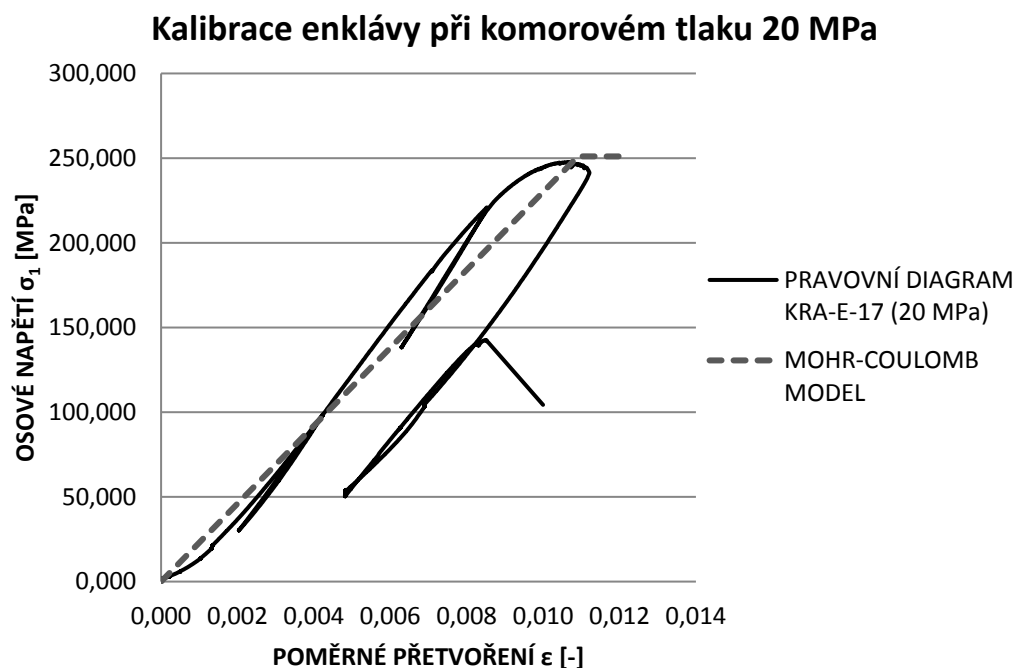


[Obr. 35] Graf z kalibrace M-C modelu, enkláva, komorový tlak 5 MPa

Kalibrace enklávy při komorovém tlaku 10 MPa



[Obr. 36] Graf z kalibrace M-C modelu, enkláva, komorový tlak 10 MPa



[Obr. 37] Graf z kalibrace M-C modelu, enkláva, komorový tlak 20 MPa

Při porovnání grafu skutečné a simulované triaxiální zkoušky je zřejmé, že Mohr-Coulombův model se svým lineárním průběhem nedokáže uspokojivě popsat chování toho typu hornin. Důležitý je také fakt, že při odtížení v těchto horninách vznikaly plastické deformace, které M-C model nedokáže vystihnout.

4 Diskuze výsledků

Všechny parametry enklávy a hostitelské horniny syenitu které byly zjištěny v rámci této bakalářské práce jsou uvedeny v tabulce níže.

[Tabulka 10] Souhrn naměřených a vypočtených hodnot

		Syenit	Enkláva	
Objemová hmotnost $\rho =$		2777,6	2806,6	[kg/m ³]
Pevnost v příčném tahu $\sigma_{\text{Ptp}} =$		9,4	10,6	[MPa]
Pevnost v jednoosém tlaku	Z odskoku Schmidtova kladívka $\sigma_s =$	58,5	89,0	[MPa]
	Jednoosou tlakovou zkouškou $\sigma =$	99,3		[MPa]
	Odvozením z triaxiální zkoušky $\sigma_{\text{corr}} =$	100,8	149,8	[MPa]
	Reziduální pevnost $\sigma_r =$	35,1		[MPa]
Pevnost při triaxiální zkoušce	Při komorovém tlaku $\sigma_3 = 5 \text{ Mpa}$ $\sigma_1 =$	129,4	168,8	[MPa]
	Při komorovém tlaku $\sigma_3 = 10 \text{ Mpa}$ $\sigma_1 =$	165,2	209,7	[MPa]
	Při komorovém tlaku $\sigma_3 = 20 \text{ Mpa}$ $\sigma_1 =$	220,5	247,7	[MPa]
Modul pružnosti $E =$			33,7	[GPa]

Z těchto údajů vyplývá, že enkláva ve všech měřených mechanických vlastnostech kvalitativně převyšuje svoji hostitelskou horninu. Toto zjištění je plně kompatibilní s prací provedenou na obdobných horninách. [1]

Za diskuzi stojí výrazně podhodnocené hodnoty tlakových pevností získaných korelací z odskoků Schmidtova kladívka. Toto může být způsobeno buď špatným provedením zkoušky, kdy těleso nebylo plně fixováno a teoreticky mohlo docházet k nežádoucímu pohlcení energie dopadajícího beranu kladívka, anebo nevhodně zvoleným korelačním vztahem. Řešením by bylo navrhnout nový korelační vztah na základě realizovaných zkoušek jednoosé tlakové pevnosti.

K diskuzi je rovněž fakt, že z porovnání pracovního diagramu skutečné a simulované triaxiální zkoušky je zřejmé, že lineární Mohr-Coulombův model nedokáže uspokojivě popsat chování studovaných hornin. Toto je způsobeno skutečností, že v průběhu testování můžeme popsat jednotlivé fáze chování horniny, kdy se hornina chová nelineárně. Proto by bylo žádoucí pro potřeby dalšího výzkumu vyvinout sofistikovaný konstitutivní model, který by dokázal popsat změny tuhosti materiálu při zatěžování a vznik plastických deformací.

5 Závěr

Tato bakalářská práce ve své rešeršní části shrnuje vybrané poznatky z mechaniky hornin a geologie třebíčského masivu. Závěry z praktické části studia fyzikálně-mechanických vlastností systému syenit-enkláva lze shrnout do následujících bodů:

- 1) Enkláva je z hlediska mechanických vlastností kvalitnější materiál než hostitelský syenit. Vzorky s kontaktem syenitu a enklávy dosahovaly vyšších pevností než vzorky samotného syenitu.
- 2) Z triaxiálních zkoušek kontaktů syenitů s enklávou je patrné, že porušení nastalo vždy v méně pevném materiálu, kterým je v tomto případě syenit. Plocha kontaktu nijak nepředurčovala tvar porušení
- 3) Syenit i enkláva vykazují při zatěžování podobné chování, které je charakteristické počátečním zpevňováním. To je způsobeno vnitřními defekty minerálů a mikrotrhlinami ve struktuře horniny.
- 4) Počáteční nárůst tuhosti je potřeba zohlednit při volbě konstitutivního modelu pro numerické modelování. Studovaný Mohr-Coulombův model nedokáže se svým lineárním průběhem tuto vlastnost zahrnout.

Na základě výsledků této práce můžeme konstatovat, že přítomnost mafických mikrogranulárních enkláv v syenitech nebude mít z inženýrského hlediska negativní vliv na kvalitu horninového masivu. Spíše naopak, enklávy díky své vyšší pevnosti mohou přispět k vyšší pevnosti masivu. V praxi je ale potřeba přihlédnout k tomu, že kvalitu masivu především v přípovrchových partiích velmi významně ovlivňují také faktory jako jsou rozpukání a zvětrávání, které mohou mít větší vliv na výsledné pevnostní charakteristiky.

Jako další možnost výzkumu v nově se rozvíjející oblasti výzkumu vícesložkových geomateriálů vidí autor vývoj sofistikovaného konstitutivního modelu, který by dokázal simulovat změny tuhosti materiálu při zatěžování a vznik plastických deformací. Díky tomu by bylo možné přesněji popsat chování tohoto typu hornin v numerických modelech.

6 Seznam použité literatury

- [1] KRMÍČEK, Lukáš. *Posouzení vlivu přítomnosti kompozičně odlišných enkláv na fyzikálně-mechanické vlastnosti základových hornin z žulového a syenitového masivu: pilotní studie z ČR*. Brno, 2015. Habilitační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky.
- [2] Hlubinné úložiště. *Správa úložišť radioaktivního odpadu* [online]. Praha, 2016 [cit.2017-03-07]. Dostupné z: <https://www.surao.cz/data/original/files/pr/brozury/brozura-hlubinne-uloziste-2016.pdf>
- [3] HORÁK, Vladislav. *Mechanika hornin: Laboratoř mechaniky hornin*. Brno, 2006.
- [4] ISRM, *The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007-2014*. 2015. 1. Springer. ISBN 9783319077123.
- [5] EDITORS a RESAT ULUSAY AND JOHN A. HUDSON. *The complete ISRM suggested method sfor rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006*. April 2007 ed. Ankara, Turkey: Commission on Testing Methods, International Society of Rock Mechanics, 2007. ISBN 9789759367541.
- [6] *EN 1997-2 (2007): Eurocode 7: Geotechnical design*. Brusel: CEN, 2007.
- [7] FROCHT, M. M. *Photoelasticity*. 3, John Wiley&Sons, 1961, New York
- [8] SCHMID, Pavel. *Zkušebnictví a technologie: Stavební zkušebnictví*. 23 s.
- [9] *ON 44 1115: Stanovení pevnosti hornin v příčném tahu*. 1976.
- [10] LI, D.; WONG, L. N. Y. The Brazilian disc test for rock mechanics applications: review and new insights. *Rock mechanics and rock engineering*, 2013, 46, 269–287.
- [11] KACHLÍK, Václav. *Geologických vývoj území České republika: Doplněk k publikaci „Příprava hlubinného úložiště radioaktivního odpadu a vyhořelého jaderného paliva“*. Praha: Správa úložišť radioaktivních odpadů, 2003.
- [12] Bubeníček, J. Geologický a petrografický vývoj třebíčského masivu. *Sborník geologických věd, řada G*, 1968, 13, 133–161.
- [13] KOTKOVÁ, J.; SCHALTEGGER, U.; LEICHMANN, J. Two types of ultrapotassic plutonic rocks in the Bohemian Massif – Coeval intrusions at different crustal levels. *Lithos*, 2010, 115, 163–176.

- [14] Geologická minulost Třebíče a okolí. Životní prostředí Třebíčska [online]. [cit. 2017-02-28]. Dostupné z: <http://zivpro.trebic.cz/geologicka-minulost-trebice-a-okoli/>
- [15] HOLUB, F. V. Ultrapotassic plutonic rocks of the durbachite series in the Bohemian Massif: Petrology, geochemistry and petrogenetic interpretation. *Sborník geologických věd, ložisková geologie, mineralogie*, 1997, 31, 5–24.
- [16] PITCHER, W. S. *The nature and origin of granite*. London: Chapman & Hall, 1993, 387 s.
- [17] DIDIER, J.; BARBARIN, B. *Enclaves and granite petrology*. Amsterdam: Elsevier, 1991, 625 s.

7 Seznam použitých obrázků

- [Obr. 1] Princip práce Schmidtova kladívka. Převzato a upraveno z [4]
- [Obr. 2] Izolinie hlavních napětí na válcovém průřezu při Brazilské zkoušce, převzato a upraveno z [7]
- [Obr. 3] Průběh napětí na válcovém průřezu při Brazilské zkoušce. Převzato a upraveno z [3]
- [Obr. 4] Rozdělení triaxiálních přístrojů
- [Obr. 5] Typy triaxiálních zkoušek. Převzato a upraveno z [5]
- [Obr. 6] Výřez z geologické mapy České republiky. Převzato a upraveno z [11]
- [Obr. 7] Přehledná strukturní mapa Třebíčského masivu (podle Bubeníčka 1968 a Zrůstka 1977 upravil Dudek). Převzato z [14]
- [Obr. 8] Mechanismus vzniku horninového masivu s obsahem mafických mikrogranulárních enkláv. Převzato a upraveno z [17]
- [Obr. 9] Horní etáž lomu Královec
- [Obr. 10] Odebrané vzorky hornin
- [Obr. 11] Jádrová vrtačka
- [Obr. 12] Zkušební těleso pro triaxiální zkoušku s kontaktem enklávy a hostitelské horniny
- [Obr. 13] Úlomek horniny s kontaktem syenitu a enklávy pro výrobu mikroskopického vzorku
- [Obr. 14] Mikroskopická fotografie kontaktu syenitu a enklávy
- [Obr. 15] Mikroskopická fotografie enklávy
- [Obr. 16] Mikroskopická fotografie akcesorických minerálu syenitu
- [Obr. 17] Naměřené hodnoty odskoku Schmidtova kladívka
- [Obr. 18] Zkušební tělesa po zkoušce v příčném tahu.
- [Obr. 19] Zkušební tělesa po jednoosé tlakové zkoušce.
- [Obr. 20] Pracovní diagramy syenitu z triaxiální zkoušky
- [Obr. 21] Regresní přímka triaxiálních pevností syenitu
- [Obr. 22] Pracovní diagramy z měření reziduálních pevností syenitu

- [Obr. 23] Zkušební tělesa syenitu po triaxiální zkoušce
- [Obr. 24] Pracovní diagramy enkláv z triaxiálních zkoušek
- [Obr. 25] Regresní přímka triaxiálních pevností enklávy
- [Obr. 26] Zkušební tělesa enkláv po triaxiální zkoušce
- [Obr. 27] Pracovní diagramy kontaktů syenitů a enkláv z triaxiálních zkoušek
- [Obr. 28] Zkušební tělesa enkláv po triaxiální zkoušce
- [Obr. 29] Mohr-Coulombova obálka pevností pro syenit
- [Obr. 30] Mohr-Coulombova obálka pevností pro enklávu
- [Obr. 31] Rozfázovaný pracovní diagram z triaxiální zkoušky
- [Obr. 32] Graf z kalibrace M-C modelu, syenit, komorový tlak 5 Mpa
- [Obr. 33] Graf z kalibrace M-C modelu, syenit, komorový tlak 10 Mpa
- [Obr. 34] Graf z kalibrace M-C modelu, syenit, komorový tlak 20 Mpa
- [Obr. 35] Graf z kalibrace M-C modelu, enkláva, komorový tlak 5 Mpa
- [Obr. 36] Graf z kalibrace M-C modelu, enkláva, komorový tlak 10 Mpa
- [Obr. 37] Graf z kalibrace M-C modelu, enkláva, komorový tlak 20 Mpa

8 Seznam použitých zkratk a symbolů

8.1 Seznam použitých symbolů

F	Síla
σ	Jednoosá tlaková pevnost / normálové napětí
σ_{ptp}	Pevnost v příčném tahu
σ_s	Jednoosá tlaková pevnost získaná korelací z odskoku Schmidtova kladívka
σ_r	Reziduální pevnost
σ_1	Osové napětí při triaxiální zkoušce
σ_3	Komorový tlak při triaxiální zkoušce
σ_{corr}	Jednoosá tlaková pevnost odvozená z triaxiální zkoušky
n	Pórovitost
ρ	Objemová hmotnost
ρ_s	Hustota
ε	Poměrné přetvoření
φ	Úhel vnitřního tření
c	Soudržnost
E	Modul pružnosti

8.2 Seznam použitých zkratk

AdMaS	Advanced Materials, Structures and Technologies
ISRM	International Society for Rock Mechanics
EC	Eurocode
ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
PPL	Pozorování s jedním nikolem
XPL	Pozorování se zkříženými nikoly
Kfs	Draselný živec
Bt	Biotit
Qz	Křemen
M-C	Mohr-Coulomb